



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA



**EFICIENCIA DE MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA RELATIVA AL
DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO DE LA TURBINA**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA

ING. MIGUEL ÁNGEL ZAMORA JUÁREZ

DIRECTOR DE TESIS

Dr. CARLOS ROBERTO FONSECA ORTIZ

TOLUCA, MÉXICO, 5 DE AGOSTO DE 2019

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	IX
SIMBOLOGÍA Y NOMENCLATURA.....	X
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. JUSTIFICACIÓN	5
1.2. HIPÓTESIS DEL PROYECTO	6
1.3. OBJETIVO GENERAL	6
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
CAPITULO 2. ANTECEDENTES	7
2.1. PRODUCCIÓN ENERGÉTICA EN MICRO CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	7
2.2. APLICACIONES DE SISTEMAS DE COSECHA DE LLUVIA.....	9
2.3. EVALUACIÓN DE TURBOMÁQUINAS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUJOS COMPUTACIONAL (CFD).....	10
CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO.....	12
3.1. TURBINAS HIDRÁULICAS	12
3.2. SISTEMAS DE COSECHA DE LLUVIA	14
3.3. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	16
CAPITULO 4. METODOLOGÍA	20
4.1. DESCRIPCIÓN Y SELECCIÓN DE TURBINAS	21
4.2. DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	22
4.3. CONFIGURACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA	25
4.4. DEFINICIÓN DEL ÁRBOL DE EXPERIMENTOS PARA ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MEDIANTE CFD Y DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE RENDIMIENTO	30
5.5. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS SELECCIONADOS	36
4.6. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA.....	37
4.7. EVALUACIÓN POR RETORNO SOCIAL DE INVERSIÓN (SROI)	38
CAPITULO 5. ZONA DE ESTUDIO.....	42

CAPITULO 6. RESULTADOS	44
6.1. DESCRIPCIÓN Y SELECCIÓN DE TURBINAS	44
6.2. DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	44
6.3. CONFIGURACIÓN HIDRÁULICA	46
6.4. PROPUESTA DEL ÁRBOL DE EXPERIMENTOS PARA ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MEDIANTE CFD Y DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE RENDIMIENTO	57
6.5. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS SELECCIONADOS	79
6.6. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA.....	82
6.7. ANÁLISIS POR RETORNO SOCIAL DE INVERSIÓN (SROI)	93
CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	106
ANEXO 1. DIAGRAMA UNIVERSAL DE MOODY	106
ANEXO 2. VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN T (ESTADÍSTICO DE DISTRIBUCIÓN T)	107
ANEXO 3. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	108
ANEXO 4. ANÁLISIS FLUIDO-ESTRUCTURA DE LA CAZOLETA	168
ANEXO 5. RESULTADOS OBTENIDOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA	175

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1. ESQUEMA GENERAL DE UNA TURBINA HIDRÁULICA EN OPERACIÓN	12
FIGURA 3.2. CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS HIDRÁULICAS	13
FIGURA 3.3. ESQUEMA GENERAL DE UN SISTEMA DE COSECHA DE LLUVIA DOMÉSTICO	15
FIGURA 4.1. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA A PARTIR DE LA COSECHA DE LLUVIAS EN ZONAS URBANAS.....	20
FIGURA 4.2. DIAGRAMA DE TURBINAS Y SUS REGÍMENES DE OPERACIÓN	22
FIGURA 4.3. GENERADOR ELÉCTRICO ASÍNCRONO DE CORRIENTE DIRECTA	23
FIGURA 4.4. CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA EN UN SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICO	24
FIGURA 4.5. GRÁFICA DE FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN NORMAL	25
FIGURA 4.6. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO ITERATIVO PARA ESTIMAR EL CAUDAL DE SALIDA Q_{esp}	28
FIGURA 4.7. PERFIL DE BOQUILLA PARA UNA TURBINA TIPO PELTON.....	29
FIGURA 4.8. DIAGRAMA DE LA ENTRADA DEL FLUJO A UNA CAZOLETA DE UNA TURBINA PELTON	30
FIGURA 4.9. PERFIL PROPUESTO PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE UNA CAZOLETA.....	32
FIGURA 4.10. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PARA MONITOREO DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN.	38
FIGURA 5.1. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA EN EL CARL.....	42
FIGURA 5.2. CROQUIS DE LA PLANTA INDUSTRIAL DANA DE MÉXICO PARA LA INSTALACIÓN DE UNA MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA	43
FIGURA 6.1. COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE EN EL GENERADOR EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REVOLUCIONES POR MINUTO.....	45
FIGURA 6.2. TENDENCIA DE PRODUCCIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA EN EL GENERADOR SEGÚN EL NÚMERO DE REVOLUCIONES POR MINUTO.....	46
FIGURA 6.3. ALTERNATIVAS PROPUESTAS DE BOQUILLAS Y TURBINA.	49
FIGURA 6.4. VISTAS DE LA BOQUILLA: A) ISOMÉTRICA, B) FRONTAL, C) LATERAL.	50
FIGURA 6.5. DOMINIO DE LA BAJADA DEL SISTEMA DE COSECHA DE LLUVIA.	51

FIGURA 6.6. MALLA UTILIZADA PARA LA SIMULACIÓN DE LA BAJADA DEL SISTEMA DE COSECHA DE LLUVIA	52
FIGURA 6.7. VISUALIZACIÓN DEL FLUJO A TRAVÉS DE LA BAJADA PARA EL ESCENARIO MÍNIMO DE OPERACIÓN $HT = 4.5\text{ m}$	54
FIGURA 6.8. VISUALIZACIÓN DEL FLUJO A TRAVÉS DE LA BAJADA PARA EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN $HT = 6\text{ m}$	54
FIGURA 6.9. CAMPO DE VELOCIDAD TOTAL EN EL FLUJO A TRAVÉS DE LA BOQUILLA PARA EL ESCENARIO MÍNIMO DE OPERACIÓN $HT = 4.5\text{ m}$	55
FIGURA 6.10. CAMPO DE PRESIÓN EN EL FLUJO A TRAVÉS DE LA BOQUILLA PARA EL ESCENARIO MÍNIMO DE OPERACIÓN $HT = 4.5\text{ m}$	55
FIGURA 6.11. CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA BASE CAZOLETA DE UNA TURBINA TIPO PELTON.....	57
FIGURA 6.12. ÁRBOL DE EXPERIMENTOS PARA EVALUACIÓN DE TURBINA PELTON MEDIANTE CFD.	59
FIGURA 6.13. MODELACIÓN 3D DE LA CAZOLETA CON VALORES DE PARÁMETROS BASE MEDIANTE SOLIDWORKS.....	60
FIGURA 6.14. MODELO CONCEPTUAL DEL DOMINIO DEL FLUJO EN LA CAZOLETA CON VALORES DE PARÁMETROS BASE MEDIANTE SOLIDWORKS	60
FIGURA 6.15. MALLA DEL DOMINIO EN LA REGIÓN DE LA CAZOLETA	61
FIGURA 6.16. REFINAMIENTO DE MALLA EN LA ZONA DONDE EL FLUIDO INTERACTÚA CON LA SUPERFICIE DE LA CAZOLETA	62
FIGURA 6.15. PRESENCIA DE VORTICIDAD EN EL MODELO DE CAZOLETA 'BUCKET_1.28djet_2.79djet' PARA CONDICIONES MEDIAS DE OPERACIÓN $V_{jet} = 10.01\text{ms}$, $HT = 6.0\text{ m}$; VISTA ISOMÉTRICA.....	64
FIGURA 6.16. PRESENCIA DE VÓRTICES DEBIDO A LA CURVATURA EN EL MODELO DE CAZOLETA 'BUCKET_1.28djet_2.79djet' PARA CONDICIONES MEDIAS DE OPERACIÓN $V_{jet} = 10.01\text{ms}$, $HT = 6.0\text{ m}$; VISTA SUPERIOR.....	64
FIGURA 6.17. PRESENCIA DE VORTICIDAD EN EL MODELO DE CAZOLETA 'BUCKET_1.28djet_2.79djet' PARA CONDICIONES MÁXIMAS DE OPERACIÓN $V_{jet} = 12.90\text{ms}$, $HT = 10.0\text{ m}$; VISTA ISOMÉTRICA	65
FIGURA 6.18. PRESENCIA DE VÓRTICES DEBIDO A LA CURVATURA EN EL MODELO DE CAZOLETA 'BUCKET_1.28djet_2.79djet' PARA CONDICIONES MÁXIMAS DE OPERACIÓN $V_{jet} = 10.01\text{ms}$, $HT = 6.0\text{ m}$; VISTA SUPERIOR.....	65

FIGURA 6.19. GRAFICA DE RESIDUALES DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO 'BUCKET_1.28djet_2.79djet' BAJO LOS ESCENARIOS PROPUESTOS	66
FIGURA 6.20. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA CAZOLETA PARA EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN CONSIDERANDO PLA COMO MATERIAL DE MANUFACTURA.....	71
FIGURA 6.21. ESTIMACIÓN DE ESFUERZOS EN LA ESTRUCTURA DE LA CAZOLETA PARA EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN CONSIDERANDO PLA COMO MATERIAL DE MANUFACTURA.....	72
FIGURA 6.22. MODELACIÓN DE CAZOLETA CON ESPESOR DE PARED DE 5 mm.....	72
FIGURA 6.23. ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA CAZOLETA MODIFICADA PARA EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN CONSIDERANDO PLA COMO MATERIAL DE MANUFACTURA.....	73
FIGURA 6.24. ESTIMACIÓN DE ESFUERZOS EN LA ESTRUCTURA DE LA CAZOLETA PARA EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN CONSIDERANDO PLA COMO MATERIAL DE MANUFACTURA.....	74
FIGURA 6.25. MODELACIÓN DEL DOMINIO DEL FLUIDO PARA LA ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CAZOLETAS: A) VISTA ISOMÉTRICA Y B) VISTA LATERAL.....	75
FIGURA 6.26. MALLA DEL DOMINIO DEL FLUIDO PARA LA ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CAZOLETAS.....	75
FIGURA 6.27. REFINAMIENTO DE LA REGIÓN DE LAS SUPERFICIES DONDE EL FLUJO INTERACTÚA CON LA CAZOLETA	76
FIGURA 6.28. LÍNEAS DE FLUJO PARA LA CONFIGURACIÓN DE 33 CAZOLETAS EN EL ROTOR BAJO EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN ($HT = 6.0m$, $V_{jet} = 10.01 ms$).....	77
FIGURA 6.29. LÍNEAS DE FLUJO PARA LA CONFIGURACIÓN DE 26 CAZOLETAS EN EL ROTOR BAJO EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN ($HT = 6.0m$, $V_{jet} = 10.01 ms$).....	77
FIGURA 6.30. BAJADA DEL SISTEMA DE COSECHA DE LLUVIA: A) VISTA FRONTAL, B) VISTA LATERAL.....	79
FIGURA 6.31. MANUFACTURA DE BOQUILLAS MEDIANTE IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL.....	80
FIGURA 6.32. INSTALACIÓN DE CAZOLETAS EN EL RODETE DE LA TURBINA.	81
FIGURA 6.33. INSTALACIÓN DE LA TURBINA Y LA BAJADA DE LLUVIA: A) VISTA ISOMÉTRICA Y B) FRONTAL.....	81
FIGURA 6.34. CORRELACIÓN ENTRE REVOLUCIONES POR MINUTO Y EL TIEMPO DE DESCARGA A 3 METROS DE CARGA HIDRÁULICA	84
FIGURA 6.35. CORRELACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA TURBINA EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA	84

FIGURA 6.36. CORRELACIÓN ENTRE REVOLUCIONES POR MINUTO Y EL TIEMPO DE DESCARGA EN EL ESCENARIO MÍNIMO DE OPERACIÓN	86
FIGURA 6.37. CORRELACIÓN ENTRE REVOLUCIONES POR MINUTO Y EL TIEMPO DE DESCARGA EN EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN	86
FIGURA 6.38. CORRELACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA DURANTE EL PROCESO DE DESCARGA A LO LARGO DEL TIEMPO PARA EL ESCENARIO MÍNIMO.....	87
FIGURA 6.39. CORRELACIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA DURANTE EL PROCESO DE DESCARGA A LO LARGO DEL TIEMPO PARA EL ESCENARIO MEDIO	87
FIGURA 6.40. CORRELACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRÁULICA DE LA TURBINA EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA EN EL ESCENARIO MÍNIMO DE OPERACIÓN.....	88
FIGURA 6.41. CORRELACIÓN DE LA EFICIENCIA HIDRÁULICA DE LA TURBINA EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA EN EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN	88
FIGURA 6.42. CORRELACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA EN EL ESCENARIO MÍNIMO DE OPERACIÓN.....	90
FIGURA 6.43. CORRELACIÓN DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DE LA CARGA HIDRÁULICA EN EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN	90
FIGURA 6.44. CORRELACIÓN DEL NÚMERO DE REVOLUCIONES POR MINUTO EN DE ACUERDO CON LA CARGA HIDRÁULICA PARA LOS ESCENARIOS MÍNIMO Y MEDIO	91
FIGURA 6.45. CORRELACIÓN DE LA POTENCIA DE SALIDA DEL GENERADOR DE ACUERDO CON LA CARGA HIDRÁULICA PARA EL ESCENARIO MÍNIMO Y MEDIO.....	91
FIGURA 6.46. MINUTOS POSIBLES DE ILUMINACIÓN EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA PRODUCIDA MENSUALMENTE POR LA MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	94
FIGURA 6.47. TENDENCIA DE INCREMENTO DE LA CARGA HIDRÁULICA Y EL CAUDAL EN LA MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA BAJO CONDICIONES MEDIAS DE OPERACIÓN.....	95
FIGURA 6.48. TENDENCIA DE INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA TEÓRICA Y LA ESPERADA A LA SALIDA DEL GENERADOR	95

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. COMPARACIÓN DE PROYECTOS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA A MICRO ESCALA.....	8
TABLA 4.1. FACTORES DE PÉRDIDAS LOCALES SEGÚN EL TIPO DE OBSTRUCCIÓN.	27
TABLA 4.2. LINEAMIENTOS EN LA CONFECCIÓN DEL ÁRBOL DE EXPERIMENTOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	34
TABLA 4.3. SELECCIÓN DEL NÚMERO DE CAZOLETAS SEGÚN LA RELACIÓN DIÁMETRO DE CHORRO Y DIÁMETRO DE TURBINA.....	35
TABLA 4.4. ESPECIFICACIONES DE MATERIALES USADOS EN IMPRESORAS 3D.	37
TABLA 4.5. SELECCIÓN DE <i>STAKEHOLDERS</i> EN EL PROYECTO.....	40
TABLA 6.1. VALORES DE PRODUCCIÓN DE VOLTAJE Y CORRIENTE ELÉCTRICA DEL GENERADOR	45
TABLA 6.2. LÁMINAS DE PRECIPITACIÓN DIARIA ESPERADAS PARA EL CASO DE ESTUDIO	47
TABLA 6.3. PROCESO DE DETERMINACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA.....	47
TABLA 6.5. FACTORES DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN LA BAJADA DEL SISTEMA.....	52
TABLA 6.6. ESTIMACIÓN ANALÍTICA DE CAUDAL ESPERADO A LA SALIDA DE LA BAJADA DEL SISTEMA DE COSECHA DE LLUVIA.	53
TABLA 6.7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN EL SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE LA BAJADA.....	56
TABLA 6.8. TIEMPOS DE DESCARGA Y ENERGÍA MEDIA ESPERADOS EN EL SISTEMA.....	56
TABLA 6.9. RESULTADOS OBTENIDOS DEL RENDIMIENTO DE LA CAZOLETA MEDIANTE CFD PARA EL PARÁMETRO <i>Lbucket</i>	63
TABLA 6.10. RESULTADOS OBTENIDOS DEL RENDIMIENTO DE LA CAZOLETA MEDIANTE CFD PARA LOS DOS PARÁMETROS EVALUADOS	68
TABLA 6.11. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LOS MODELOS DE CAZOLETAS ‘ <i>BUCKET_1.82djet_2.28djet</i> ’ Y ‘ <i>BUCKET_1.82djet_2.79djet</i> ’	69
TABLA 6.12. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA LOS MODELOS DE CAZOLETAS ‘ <i>BUCKET_1.82djet_2.28djet</i> ’ Y ‘ <i>BUCKET_1.55djet_2.28djet</i> ’	69
TABLA 6.13. CANTIDAD DE MATERIAL NECESARIO PARA LA IMPRESIÓN DE LOS MODELOS DE CAZOLETAS SELECCIONADOS	70
TABLA 6.14. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS FLUIDO ESTRUCTURA EN LA CAZOLETA	71

TABLA 6.15. RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS FLUIDO ESTRUCTURA EN LA CAZOLETA	73
TABLA 6.16. NÚMERO DE CAZOLETAS ESTIMADOS DE ACUERDO CON RELACIONES EMPÍRICAS.....	74
TABLA 6.17. CANTIDAD DE MATERIAL NECESARIO DE ACUERDO CON EL NÚMERO DE CAZOLETAS	76
TABLA 6.18. RESULTADOS OBTENIDOS DEL RENDIMIENTO DE LA TURBINA DE ACUERDO CON EL NÚMERO DE CAZOLETAS	78
TABLA 6.19. RESULTADOS OBTENIDOS DEL SISTEMA OPERANDO A 3 METROS DE CARGA HIDRÁULICA	82
TABLA 6.20. ESTIMACIÓN DE EFICIENCIA HIDRÁULICA DE LA TURBINA POR DESCARGA EN EL ESCENARIO MÍNIMO DE OPERACIÓN	85
TABLA 6.21. ESTIMACIÓN DE EFICIENCIA HIDRÁULICA DE LA TURBINA POR DESCARGA EN EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN	85
TABLA 6.22 ESTIMACIÓN DE EFICIENCIA DEL GENERADOR POR DESCARGA PARA EL ESCENARIO MÍNIMO DE OPERACIÓN.....	89
TABLA 6.23. ESTIMACIÓN DE EFICIENCIA DEL GENERADOR POR DESCARGA PARA EL ESCENARIO MEDIO DE OPERACIÓN	89
TABLA 6.24. ESTIMACIÓN DE ENERGÍA GENERADA DESCARGANDO HASTA $HT = 3.0\ m$	92
TABLA 6.25. NÚMERO DE EVENTOS DIARIOS ESPERADOS.....	93

LISTA DE ACRÓNIMOS

Acrónimo	Descripción
CAD	Computer-Aided Design [Diseño Asistido por Computadora]
CARL	Curso Alto del Río Lerma
CFD	Computational Fluid Dynamics [Dinámica de Fluidos Computacional]
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
FSI	Fluid Structure Interaction [Interacción Fluido Estructura]
IITCA	Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
NASA	National Aeronautic and Space Administration [Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio]
PVC	Policloruro de Vinilo
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG	Sistemas de Información Geográfica
UAEM	Universidad Autónoma del Estado de México

SIMBOLOGÍA Y NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
A_{bajada}	Área transversal de la bajada	m^2
A_{bucket}	Altura de la cazoleta	mm
A_{jet}	Área de la sección transversal del chorro a la salida	m^2
A_t	Área tributaria o de captación	m^2
C_e	Coeficiente de escurrimiento	-
C_p	Calor específico del fluido	$\frac{J}{kg \cdot K}$
d_{jet}	Diámetro del chorro a la salida de la boquilla	in
f	Factor de pérdidas por fricción en la superficie	-
g	Constante de gravitación universal	$\frac{m}{s^2}$
gdl	Grados de libertad	-
H_i	Carga hidráulica equivalente	m
H_p	Altura de presión absorbida por el rodete	m
H_T	Carga hidráulica neta	m
H_u	Altura total absorbida por el rodete	m
I_{gen}	Corriente eléctrica generada por el sistema	A
k_j	Coeficiente de pérdidas locales en el sistema	-
k	Indicador de rendimiento de la cazoleta	-
L_{bucket}	Longitud de la cazoleta	mm
L_i	Distancia entre secciones de la tubería	m
N_b	Número de cazoletas	-
n_{nozzle}	Número de boquillas utilizadas	-
P	Presión del fluido	kPa
P_i	Lamina de precipitación esperada	mm
Q_{esp}	Caudal esperado por boquilla	$\frac{l}{s}$
Q_{sum}	Caudal suministrado a la turbina	$\frac{l}{s}$
Re	Número de Reynolds	-
r_{turb}	Radio de la turbina	m

S_d	Desviación estándar	-
T	Cantidad de calor del fluido	°C
t_c	Valor critico de probabilidad	-
$t_{descarga}$	Tiempo de descarga del sistema	s
t_{lamp}	Tiempo de iluminación	min
t_n	Valor estadístico de prueba	-
U	Velocidad tangencial de la cazoleta	$\frac{m}{s}$
u	Velocidad en dirección x	$\frac{m}{s}$
V_{gen}	Voltaje generado por el sistema	V
V_i	Volumen de captación esperado	m^3
V_{jet}	Velocidad del chorro a la entrada de la cazoleta	m^3
v	Velocidad en dirección y	$\frac{m}{s}$
w	Velocidad en dirección z	$\frac{m}{s}$
w_1	Velocidad relativa a la entrada de la cazoleta	$\frac{m}{s}$
w_2	Velocidad relativa a la salida de la cazoleta	$\frac{m}{s}$
\dot{W}_{esp}	Potencia esperada o teórica de la turbina	W
\dot{W}_{gen}	Potencia a la salida del generador	W
\dot{W}_{turb}	Potencia entregada por el rodete de la turbina	W
x_i	Datos de la muestra	-
\bar{x}_i	Media	-
α	Nivel de significancia	-
β_2	Angulo de desviación del chorro	°
ε	Rugosidad del material	mm
ρ	Densidad del fluido	$\frac{kg}{m^3}$
σ	Desviación estándar	-
σ_{gr}	Grado de reacción de una turbomáquina	-
μ	Media poblacional	-
λ	Conductividad térmica del fluido	$\frac{W}{m \cdot K}$

ϕ_{tub}	Diámetro de la bajada	<i>in</i>
η_{turb}	Eficiencia de la turbina	-
η_{gen}	Eficiencia del generador	-
ν	Viscosidad cinemática del fluido	$\frac{m^2}{s}$
ω_{turb}	Velocidad angular de la turbina	$\frac{rad}{s}$

RESUMEN

La energía hidroeléctrica es una fuente de energía renovable y sustentable. Sin embargo, la generación hidroeléctrica es casi exclusiva en grandes instalaciones ($> 10 \text{ kW}$). La producción a micro escala sigue siendo evaluada como una alternativa viable para la generación de energía eléctrica debido a que este tipo de instalaciones requieren un menor costo de instalación y de mantenimiento.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el rendimiento de una micro central hidroeléctrica operando a partir de un sistema de cosecha de lluvia mediante la optimización de la caracterización geométrica de la turbina. Este proyecto pretende aprovechar la energía potencial del agua con diferentes cargas hidráulicas para generar electricidad en zonas urbanas. El sistema fue adecuado para operar en una construcción de tipo industrial en la Zona Metropolitana de Toluca, México. Pocos trabajos han evaluado este medio como sistema de generación de energía eléctrica como alternativa para satisfacer la demanda local de energía.

La metodología fue desarrollada con el propósito de: a) definir la configuración hidráulica del sistema de acuerdo con el régimen de precipitación y a los requerimientos establecidos por el generador; b) estimar la eficiencia en función de la variación de parámetros geométricos mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y; c) validar el modelo con datos experimentales. Este proyecto emplea un método innovador para la manufactura del prototipo como lo es la impresión tridimensional.

Debido a la naturaleza del sistema de cosecha de lluvia, el tipo de turbina seleccionada fue una turbina tipo Pelton. Las características hidráulicas fueron definidas de acuerdo con la infraestructura disponible, tales como: el diámetro de tubería, el número de boquillas, válvulas y compuertas. Además del valor del diámetro de la turbina (0.4004 m). Mediante CFD, fue posible analizar el comportamiento del flujo (velocidad y presión) en la turbina con el propósito de optimizar su geometría. La modelación numérica permitió estimar la eficiencia esperada en función de la variación de las velocidades de entrada y salida de la turbina Pelton $\left(k_2/k_1\right)$.

Por medio de un circuito electrónico, se registró el número de revoluciones por minuto y por consecuencia fue posible estimar la eficiencia y la cantidad de energía producida en función del voltaje y la corriente eléctrica alcanzadas por el sistema bajo condiciones de operación controladas. En general, el sistema fue capaz de producir energía eléctrica utilizando el agua proveniente del sistema de cosecha de lluvia alcanzando una eficiencia máxima de 81.13%.

ABSTRACT

Hydroelectric power is a renewable and sustainable approach in energy production. However, hydro power generation is almost exclusively used at large scale ($> 10\text{ kW}$). On a micro scale, it is still being assessed as a viable alternative to produce energy, even though this generation process seems to require lower installation and maintenance costs.

The main aim of this work is the performance assessment of a micro hydro power station integrated into a rainwater harvesting system based on the optimal dimensioning of the turbine geometry. This project proposes different hydraulic heads for a sustainable model that uses that potential energy to generating electrical energy in urban areas. As case of study, the system was set up at an industrial facility in the Toluca Metropolitan Zone, Mexico. Few works have assessed this type of electricity generation as an alternative to meet local energy demand.

A methodology was developed in order to: a) determine hydraulic setting-up based on the precipitation regime and operational requirements of the generator; b) assess efficiency indicator under size variation of main element through Computational Fluid Dynamic (CFD); and c) validate the prototype throughout a 3D model. This project used 3D physical printing, an innovative tool for prototype manufacturing.

Due to the nature of the rainwater harvesting system, the type of turbine selected was Pelton turbine. Afterwards, hydraulic characteristics were defined, such as the number and diameter of conduit pipes, nozzles, valves and gates used and their diameters and the initial size of turbine (0.4004 m). Through CFD, it was possible to analyze fluid behavior (velocity and pressure fields) in the turbine in order to define a suitable geometry. Numerical modeling of the turbine allowed to estimate expected system efficiency according to the variation of coefficients k_2/k_1 , which measure fluid velocity at inlet and outlet of the Pelton turbine.

By means of an electronic circuit, which measured number of revolutions per minute and power generation (voltage and electrical current) of the system, the efficiency and the energy produced by the system were analyzed under both controlled conditions and real-time rainfall conditions. In general, the hydro power station managed to generate electrical energy using rainwater harvesting system which achieved up to 81.13% of efficiency.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con Yanine *et al.* (2015), los sistemas energéticos sustentables futuros abarcarán las actuales redes eléctricas de distribución. La poca factibilidad ambiental de los sistemas energéticos tradicionales ha impulsado a la sociedad en la búsqueda de nuevas fuentes de energía y el desarrollo de tecnologías que permitan generar energía de manera limpia y que mitiguen el grave daño ambiental presente en la actualidad.

La producción de energía eléctrica es esencial para la vida, el bienestar y el desarrollo sustentable de las sociedades humanas. La energía hidroeléctrica es una fuente de energía limpia, renovable y amigable con el ambiente, que durante 2015 produjo un estimado de $3.930 \frac{TW \cdot h}{año}$, que representó el 16% de electricidad generada a nivel mundial y el 78% en la rama de energías renovables (Berga, 2016). La capacidad hidro global es de aproximadamente 1 100 GW (principalmente en Asia y América Latina), y ha aumentado con una tendencia anual de 3.5% en los últimos 5 años (Dixon, 2005; Berga, 2016).

Según Mataix (2008), las centrales hidroeléctricas normalmente utilizan dos métodos para aprovechar la carga hidráulica o salto natural de un cauce para su instalación. El primer método consiste en interceptar la corriente con un dique o una presa para elevar el nivel del río, lo cual reduce la velocidad de la corriente y pérdidas por rozamientos. Mientras que el segundo consiste en la desviación del curso natural de la corriente hacia un canal y/o conducto cerrado (tubería) que dirige el agua hacia la central y posteriormente la devuelve al río. Considerando esto, las centrales hidroeléctricas pueden clasificarse por el tipo de embalse, la potencia que genera o por la altura del salto que dispone.

Sin embargo, existen otros métodos para aprovechar la energía del agua, principalmente a microescala (Twidell & Weir, 2006). Por ejemplo, el aprovechamiento de aguas subterráneas (energía geotérmica) o la captación mediante un sistema de cosecha de lluvias (Thomas *et al.* 2014; Cheng & Liao, 2009, Campisano & Modica, 2012).

La cosecha de lluvia es un sistema que intercepta el agua de lluvia a través de una superficie natural o artificial (Hosseini *et al.*, 2013). Es, además, un método muy económico para aumentar la disponibilidad de agua para diversas actividades con un sistema de fácil instalación (Su *et al.*, 2009). Por ello, se pretende aprovechar la naturaleza de estos sistemas para posicionarlos como un medio alternativo para la generación de electricidad en zonas urbanas sin provocar algún impacto negativo al medio ambiente durante su operación.

Considerar la cosecha de lluvia como un medio para suministrar agua en una micro central eléctrica puede ser un argumento adicional para optar por sistemas de producción de baja escala. Por ello, para diseñar e implementar estos sistemas, es necesario evaluar los regímenes de precipitación de la zona para estimar el agua disponible, considerar la infraestructura disponible o el diseño de la turbina y otros accesorios (Archetti, 2011; Zamora, 2015). La información disponible sobre este tipo de proyectos aún es escasa. Sin embargo, existen algunos trabajos que proponen esta aplicación para la cosecha de lluvia.

El diseño de turbinas y elementos adicionales aún depende mucho de la experiencia ganada de trabajos previos y de experimentación tradicional (Dixon, 2005; White, 2011). Por ello, se han desarrollado métodos para reducir la complejidad en este proceso, siendo el más utilizado, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés; Chung, 2002). La aplicación de CFD permite modelar, mediante esquemas numéricos (López, 2015), el flujo a través de diversos elementos que conforma el sistema proporcionando un mejor diseño hidráulico, una mejor comprensión en el comportamiento del flujo y su influencia en el rendimiento global del sistema (Dixon, 2005).

Este proyecto busca diseñar y construir un sistema que permita transformar la energía potencial del agua captada mediante un sistema de cosecha de lluvias en energía eléctrica y destinarla a un sistema de almacenamiento para su posterior uso. De acuerdo con Nasir (2014), para diseñar un micro central hidroeléctrica se debe tener en cuenta diversas consideraciones, como: a) la cantidad de caudal y carga hidráulica disponibles; b) la velocidad angular a la que operara la turbina (establecida por el generador eléctrico); c) la potencia esperada; entre otros aspectos.

Los beneficios de dicho sistema son, en primer lugar, proporcionar una alternativa sustentable para la generación de energía eléctrica a partir de la cosecha de lluvia en zonas urbanas y mitigar el impacto negativo durante su operación. En segundo lugar, la generación de conocimiento y el desarrollo tecnológico propio.

Cabe mencionar, que como zona de estudio será considerada la zona urbana del Valle de Toluca, en el Estado de México, la cual se localiza dentro de la cuenca del Curso Alto del Río Lerma (CARL; Esteller y Díaz, 2000).

1.1. Justificación

En la última década, los problemas ambientales relacionados a la crisis energética han crecido a un nivel global (Nasir, 2014). De acuerdo con la Secretaría de Energía (2018), la producción mundial de energía primaria, durante 2016, fue de 13 760.81 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MMtep), 0.3% menor que en 2015. De esta producción de energía, el 14.0% correspondió a fuentes de energía renovables y el resto corresponde a recursos no renovables, tales como el gas natural, el petróleo crudo, la energía nuclear y el carbón y sus derivados.

Este tipo de problemática, entre otras, se encuentran creciendo continuamente, tanto que sugieren la necesidad de alternativas tecnológicas que aseguren su solución. Una respuesta práctica y factible es generar electricidad tan cerca como sea posible del lugar de consumo para disminuir la cantidad de pérdidas en las redes de distribución de energía. Además, el uso de alguna fuente de energía renovable, como la eólica, solar, mareomotriz o las plantas hidroeléctricas; podría generar un menor impacto en el medio ambiente (Nasir, 2014).

Considerando que el 57% de la población en México radica en zonas metropolitanas, la aplicación de cosecha de lluvia tiene potencial para convertirse en un medio útil para la generación de energía eléctrica. Considerando esto, las grandes urbes pueden convertirse en un sistema que no solo demanda energía sino en una red capaz de producir parte de su demanda energética. De acuerdo con la CONAGUA (2016), la lámina media de precipitación anual en México fue de 740 mm durante el periodo 1981-2010. De esta manera, el panorama de generación de energía eléctrica a partir de cosecha de lluvia es abierto, dado que este proyecto busca definir un sistema que permita transformar la energía potencial del agua proveniente de la captación de lluvia en zonas urbanas en eléctrica y destinarla a un sistema de almacenamiento para su posterior uso. El análisis costo-beneficio puede ser llevado a cabo mediante la relación entre el ahorro del consumo energético (a partir de la tarifa eléctrica) y el costo de instalación del sistema descrito en un inmueble.

Los beneficios de este trabajo se pueden agrupar básicamente en tres. En primer lugar, la generación de conocimiento. Al contar con pocos antecedentes en este contexto, se espera que este proyecto logre innovar en el campo energético. En segundo lugar, propuesta de un sistema sustentable y amigable con el ambiente para producir energía eléctrica. Finalmente, la propuesta de usar técnicas nuevas en la manufactura de piezas para la generación de energía.

1.2. Hipótesis del proyecto

La modelación sistemática y evaluación de los parámetros geométricos de una turbina permitirá aumentar la eficiencia en la generación de energía en una micro central hidroeléctrica.

1.3. Objetivo general

Evaluar la eficiencia de una micro central hidroeléctrica en función de la variación de parámetros geométricos de una turbina mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y la experimentación de prototipos seleccionados.

1.4. Objetivos específicos

1. Comparar la capacidad de producción de diversos generadores eléctricos que transformen la energía potencial del agua en energía eléctrica, según su torque de operación para el diseño del sistema de almacenamiento de energía producida.
2. Definir parámetros hidráulicos y condiciones de entrada del sistema.
3. Definir un árbol de experimentos de la variación de parámetros geométricos y diferentes escenarios de operación del sistema mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).
4. Establecer indicadores de rendimiento para las alternativas de diseño de las turbinas.
5. Estimar la eficiencia de las turbinas derivadas del árbol de experimentos bajo diferentes escenarios y condiciones de operación.
6. Analizar la factibilidad económica del sistema mediante una evaluación por retorno social de inversión (SROI).

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

En el sector energético, la energía hidroeléctrica es la fuente renovable mejor establecida y más utilizada con respecto a otras fuentes de energías renovables como la eólica, la solar o la biomasa (Twidell & Weir, 2006). A pesar de que este tipo de sistemas han sido, hasta el momento, exclusivos para grandes instalaciones ($>1\ 000\text{ kW}$) y/o grandes flujos de agua ($>10\text{ m}^3/\text{s}$; Mataix, 2008), la producción hidroeléctrica puede abrirse paso para operar a una micro escala, es decir, en obras hidráulicas con flujos de agua más pequeños como acueductos, canales de irrigación, sistemas de cosecha de lluvia (Archetti, 2011).

2.1. Producción energética en micro centrales hidroeléctricas

Un concepto que ha ganado fuerza, sobre el enfoque de producción de energía eléctrica a una microescala, es el de micro redes hidroeléctricas (Falco & Webb, 2015; Archetti, 2011). El término se define como un conjunto de centrales hidroeléctricas con una escala de mini producción ($< 1\text{ MW}$) como alternativa para el suministro de energía a nivel regional (Santoli *et al*, 2015; Berga, 2016).

Inicialmente, la producción eléctrica a partir de la energía potencial del agua estaba planeada para ser aplicada a una escala micro; sin embargo, la construcción de grandes centrales hidroeléctricas y la presencia de grandes redes de distribución propiciaron que la micro producción fuera relegada (Mataix, 2008). Comparado con un sistema hidroeléctrica tradicional, las micro redes hidroeléctricas reducen los costos de operación y mantenimiento (Archetti, 2011).

El diseño de una micro central hidroeléctrica considera aspectos como: a) la capacidad de producción esperada; b) las condiciones hidráulicas (caudal y carga hidráulica); c) el tipo de generador eléctrico y; d) la forma de evaluar y medir la eficiencia de la micro central. Todo ello, permite definir tanto el dimensionamiento geométrico como de producción de energía.

Diversos autores han desarrollado diseños de micro centrales para la generación de energía (tabla 2.1). Ikeda *et al*. (2010) propusieron un modelo de nano turbina para la generación de energía eléctrica a partir de la caída de agua en canales artificiales. El trabajo plantea la evaluación de una turbina mediante pruebas controladas, variando los valores del caudal suministrado y la forma de entrada del agua a los álabes de la turbina. La investigación demostró una influencia entre la posición relativa del rotor y la manera en que el agua entra a la turbina, así como su efecto en su eficiencia y la generación estable de energía eléctrica. Los autores proponen la implementación del sistema en una zona rural para el abastecimiento local de energía como una posible aplicación del modelo.

Tabla 2.1. Comparación de proyectos sobre la producción de energía hidroeléctrica a micro escala

Autor(es)	Fuente de suministro	Tipo de turbina utilizada	Energía media producida [W]	Eficiencia alcanzada [%]
Bhargav, et al. (2015)	Tanque elevado en una construcción	Aspas de motor de enfriamiento	15.0	-
Ikeda et al. (2010)	Canales artificiales	Banki-Mitchell	100-200	83.0
Uchiyama et al. (2016)	Sistema de conducción de drenaje	Hollow	-	19.0
Vagnoni et al. (2018)	Tuberías	Axial	-	84.0
Morabito & Hendrick (2019)	Tanque elevado	Francis Modificada	-	92.1

En cauces naturales, Anugrah *et al.* (2015) evalúan el rendimiento y la eficiencia de tres micro centrales hidroeléctricas instaladas en la región de Sumatra del Este, Indonesia. Dichas micro centrales son: Pancuang Taba, Muaro Air y Koto Ranah, cuya capacidad de producción es de 40 kW, 30 kW y 30 kW respectivamente. El estudio considera los efectos del cambio climático en su producción de energía y el impacto en su rendimiento, mediante el empleo de un SIG (Sistema de Información Geográfico) y la aplicación del método de Mock (1973) para estimar el volumen de escurrimiento en una cuenca.

De esta manera, se evaluaron diversos datos de entrada como precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento para determinar la variación de escurrimiento durante un periodo de 20 años. El análisis demostró una disminución de la producción de energía en las tres micro centrales de la zona durante la época de estiaje. Durante la época de lluvias, se apreció una disminución en el valor promedio de flujo máximo de la temporada. Lo anterior debido a la disminución de precipitación y el incremento de temperatura en la zona debido a los efectos del cambio climático.

El primer trabajo entrega resultados medidos experimentalmente y un análisis de sensibilidad sobre las condiciones de operación que reflejan la eficiencia de una micro central hidroeléctrica. El segundo arroja una perspectiva aplicada en relación con los efectos que ocasiona el cambio climático en la generación de energía en una zona determinada.

El desarrollo de proyectos de micro centrales hidroeléctricas está en una etapa preliminar y empezando a proporcionar una cantidad considerable de información para su aplicación en el futuro. Este tipo de sistemas suele generar incertidumbre en su producción, pero los beneficios que otorgan pueden ser potenciales las turbinas hidráulicas para estos sistemas pueden fabricarse en serie (en las centrales hidroeléctricas tradicionales no es posible; Mataix; 2008) y, existe un potencial de utilizar flujos de agua como los provenientes de sistemas de irrigación, sistemas de cosecha de lluvia como fuente alternativa de suministro.

2.2. Aplicaciones de sistemas de cosecha de lluvia

Un sistema de cosecha de lluvia es un sistema que permite la disposición, almacenamiento y uso del agua de lluvia captada en techos, jardines o alguna otra superficie impermeable para un uso de tipo doméstico, industrial, agrícola (Sample & Liu, 2014). Es reconocido que el agua de lluvia podría reemplazar al agua potable para algunos usos que demandan una menor calidad de agua como riego de cultivos, descarga de inodoros, limpieza de azoteas, lavado de autos (Campisano & Modica, 2012). Los sistemas de esta naturaleza dependen de la precipitación que se presente en la zona, con la limitante que en determinadas épocas del año la tendencia de las lluvias puede reducirse considerablemente, como parte del mismo ciclo estacional del planeta.

Debido a la creciente presión a la que son sometidos los recursos hídricos (resultado de una inadecuada gestión del agua; CAP-NET, 2009), los sistemas de cosecha de lluvia son un medio alternativo que pueden ser considerados para incrementar la disponibilidad del agua en zonas urbanas, agrícolas e industriales.

Imteaz *et al.* (2014) optimizaron un sistema de cosecha de lluvia considerando los regímenes de precipitación, el área de captación disponible, la demanda de agua diaria (principalmente para irrigación) y las pérdidas generadas por el mismo sistema. Con ello los autores concluyeron que es posible alcanzar un ahorro monetario gracias a dicha optimización y asignación de agua.

Es de gran utilidad disponer de metodologías para evaluar el beneficio de emplear los sistemas de cosecha de lluvia. Stec *et al.* (2017) proponen una metodología para estimar el ahorro monetario y el volumen de agua ahorrado con la aplicación de sistemas de cosecha de lluvia y de reutilización de aguas grises en usos domésticos, considerando valores promedio de consumo de agua diarios por individuo. Dicha propuesta se basa en la idea de aprovechar el agua para cierta aplicación dependiendo de su calidad.

El trabajo de Imteaz *et al.* (2014) optimiza la capacidad de almacenamiento de un sistema de cosecha de lluvia con el fin de aumentar la disponibilidad de agua para diversas actividades (p.e. irrigación o limpieza).

Mientras que el estudio de Stec *et al.* (2017), proporciona una metodología con aspectos que pueden considerarse al evaluar la factibilidad de emplear estos sistemas, como volúmenes de consumo promedio.

La implementación de los sistemas de cosecha de lluvia ha mostrado beneficios como incrementar la cantidad de agua disponible, la reducción de presencia de inundaciones en zonas urbanas, mejor asignación y distribución de los recursos hídricos y disminución de la demanda de agua de fuentes no renovables entre otros.

2.3. Evaluación de turbomáquinas mediante Dinámica de Flujos Computacional (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), es un término genérico para esquemas numéricos que representan un flujo de másico y *momentum* de un fluido continuo (López, 2015). La CFD fue desarrollada durante la década de 1950 por ingenieros y matemáticos con el objetivo de resolver diversos problemas de transferencia de calor y masa. Teniendo en cuenta que, las ecuaciones de movimiento de los fluidos que son la base del código fueron formuladas desde el siglo XIX (Bates *et al.*, 2005).

Entre las principales áreas de aplicación, destacan: la industria automotriz (diseño de autos aerodinámicos), la aeronáutica (diseño de aviones) y la mecánica en general (diseño de turbo-bombas, turbinas, motores, radiadores, etc.; López, 2015). En este último, el diseño, instalación y uso de turbinas hidráulicas no es un tema nuevo, desde mediados del siglo XIX se han propuesto métodos y mecanismos para aprovechar la energía potencial del agua y transformarla en energía eléctrica para el beneficio de la sociedad (Gelpke & Howell, 2017; Dixon, 2005).

Para el caso de diseño de turbomáquinaria, la CFD es útil para evaluar y optimizar modelos a través del comportamiento del fluido entre cada uno de los elementos que integran un sistema (álabes, cajones, aspas, rotores, etc.). Chongji *et al.* (2016) evaluaron la influencia en la geometría del codo del inyector y la aguja de la boquilla, así como el comportamiento del chorro de agua y el aire, como dominios (o volumen de control a evaluar) diferentes. La modelación mostró que, tanto el dominio del chorro del agua como el del aire no generaban pérdidas importantes en la velocidad del fluido. El dominio en el codo y la aguja del inyector, reveló una importante variación en la velocidad de salida del chorro.

Souari & Hassairi (2013) modelaron y evaluaron, mediante simulación numérica, el flujo de agua a través de los cajones de una turbina tipo Pelton. La modelación se realizó tomando en cuenta el relevo y cambio de elementos que se produce entre cada uno de los cajones y la forma en que el chorro de agua entra a cada uno de ellos. Para este caso, se consideraron aspectos dinámicos que se presentan realmente en la operación de la turbina, como la presencia de fronteras móviles entre cada cajón (*bucket* o relevo).

El primer trabajo mencionado se realizó bajo la consigna de evaluar la sensibilidad que podría ser observada en los elementos que dirigen el fluido a la entrada de la turbina. El método muestra una justificación importante en la geometría y características del codo y de la aguja de la boquilla. Mientras que el segundo trabajo, maneja el uso de fronteras móviles (debido al relevo de los cajones durante su operación), demostrando la necesidad de definir el número óptimo de cajones.

Rai *et al.* (2016), Zidonis & Aggidis (2016), Alnakhlani *et al.* (2015) evaluaron mediante CFD, el efecto de la geometría de los cajones y álabes de las turbinas, el ángulo de salida del chorro y el volumen de los cajones en la eficiencia de una turbina de tipo Pelton. La aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) tiene varias aplicaciones en el diseño de turbinas y sus accesorios. Lo cual, lo convierte en una herramienta poderosa para evaluar los modelos propuestos, disminuyendo el número de pruebas con prototipos manufacturados.

CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO

Reflexionando un poco, el agua y la energía son recursos indispensables para el desarrollo de las sociedades y la supervivencia del ser humano (Zhi-Yun *et al*, 2013). Las cuales requieren una mayor cantidad conforme el tiempo transcurre debido al crecimiento poblacional, industrial, comercial, entre otros. El siguiente apartado expone los conceptos básicos con los que se le da forma y que define las bases de un sistema de generación de energía eléctrica que opera a partir de un sistema de cosecha de lluvia en zonas urbanas. Los resultados esperados de este proyecto se basan en un conjunto de conocimientos, técnicas y métodos que aprovechan los recursos hídricos para la producción de energía de una forma sustentable.

3.1. Turbinas hidráulicas

De acuerdo con Atthanayake (2009), una turbina hidráulica es una maquina rotatoria (turbomáquina) que aprovecha la energía potencial y/o cinética de un flujo de agua y la convierte en energía mecánica. Las turbinas hidráulicas están conformadas, según el tipo de turbina, por aspas, álabes o cazoletas (también conocidos como *buckets*) que se encuentran adheridas fijamente a un eje llamado rodete, rotor o *runner* y que a su vez está conectado a un generador que permite transmitir la energía mecánica y convertirla en eléctrica (Alnakhilani *et al*, 2015). La Figura 3.1 muestra el esquema general de una instalación que opera con una turbina hidráulica como elemento principal.

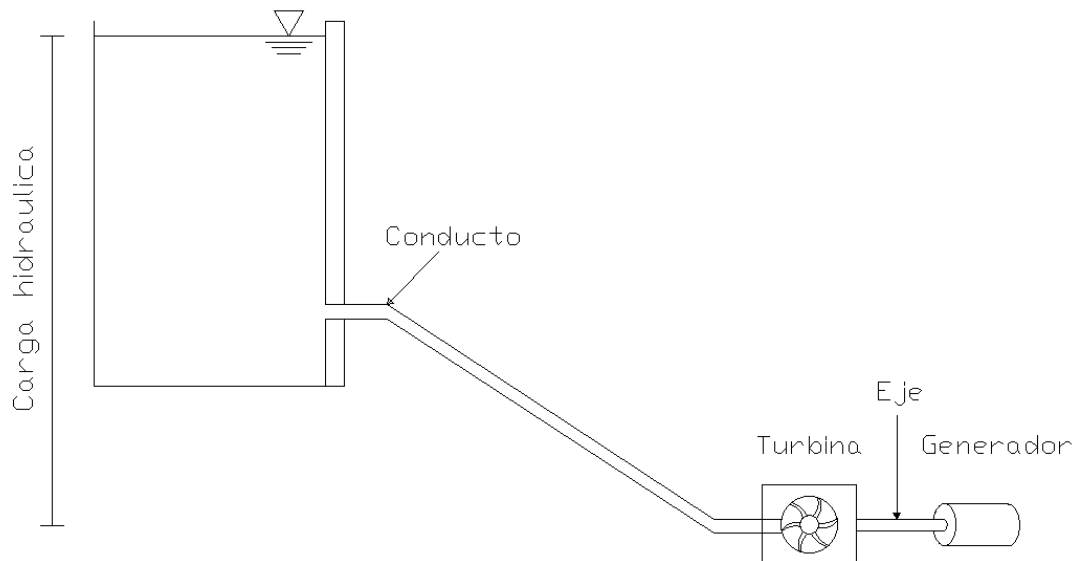


Figura 3.1. Esquema general de una turbina hidráulica en operación (Nasir, 2014)

De acuerdo con Mataix (2008), las turbinas se clasifican en dos tipos, de reacción y de impulso o acción (Figura 3.2). Esta clasificación se basa en el concepto de grado de reacción σ_{gr} de una turbomáquina que se refiere al modo como trabaja el rodete. Para el caso de una turbina hidráulica, el grado de reacción es determinado mediante la ecuación 3.1, donde H_p es la altura de presión absorbida por el rodete $[m]$ y H_u es la altura total absorbida por el rodete $[m]$. Las máquinas con grado de reacción igual a cero se denominan de acción debido a que la presión del agua no cambia en los álabes y el rodete no está inundado (admisión parcial), operando a presión atmosférica.

$$\sigma_{gr} = \frac{H_p}{H_u} \quad (3.1)$$

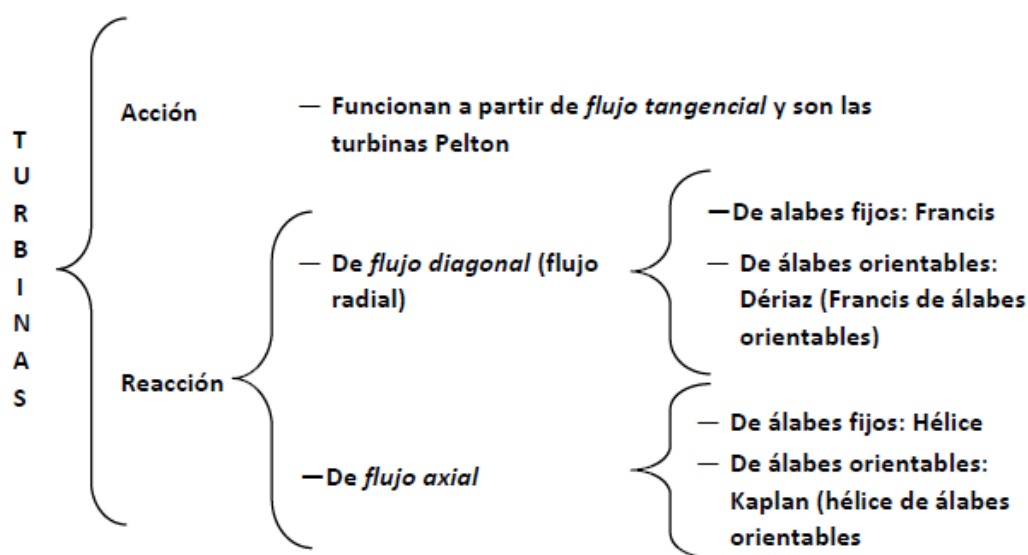


Figura 3.2. Clasificación de las turbinas hidráulicas (Mataix, 2008)

La diferencia entre las turbinas de acción y de reacción recae en la extracción de energía en función de la presión del fluido en la turbina. Es decir, en las turbinas de reacción el fluido cubre completamente la turbina, donde la presión es superior a la atmosférica ($P > 101.325 \text{ kPa}$), la aceleración del fluido causa un impulso en los álabes donde la energía potencial es progresivamente absorbida (Kothandaraman, 2007). Mientras que, las turbinas de impulso convierten primero la presión de la carga hidráulica en un chorro de alta velocidad a través de una boquilla, transformando la energía potencial en cinética, que posteriormente impacta con los álabes en una posición determinada. La turbina no se encuentra cubierta completamente por el agua ($P = 101.325 \text{ kPa}$) y el chorro que impacta se encuentra, teóricamente, a una presión y velocidad constantes (White, 2011).

La potencia esperada \dot{W}_{esp} de una turbina hidráulica es estimada mediante la ecuación 3.2 (Fox & McDonald, 2002); donde ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), g la constante de gravitación universal (m/s^2), H_T es la carga hidráulica disponible en el sistema o neta (m) y Q_{sum} es el caudal suministrado (m^3/s). La ecuación es una primera estimación de capacidad de producción para su posterior estimación de eficiencia entre la energía potencial y la adsorbida por la turbina.

$$\dot{W}_{esp} = \rho \cdot g \cdot H_T \cdot Q_{sum} \quad (3.2)$$

Es importante mencionar que, la eficiencia de la turbina es afectada, principalmente, por tres factores: a) pérdidas hidráulicas o de potencia debido a irregularidades (turbulencia, vórtices, etc.) a través de los diferentes elementos que integran el sistema; b) pérdidas en el flujo debido a cambios de dirección, reducción de áreas, etc., y; c) pérdidas mecánicas utilizados para transmitir la energía de la turbina al generador (Nasir, 2013).

3.2. Sistemas de cosecha de lluvia

Un sistema de cosecha de lluvia (Figura 3.3) se define como una unidad de captación, almacenamiento y aplicación de agua de lluvia obtenida del escurrimiento de una superficie impermeable (techos, jardines, etc.; Fonseca *et al.*, 2017). Una de sus aplicaciones es la de proveer agua para consumo humano y/o agrícola (OPS, 2004). De acuerdo con Li *et al.* (2010), un sistema de cosecha de lluvia está integrado principalmente por tres elementos:

- **Área de captación o captador:** Este elemento debe ser poco permeable y evitar la contaminación del agua de lluvia. Los techos de construcciones son los tipos de captadores más comunes utilizados para la cosecha de lluvia. El material de construcción y la efectividad del área de captación influyen directamente en la eficiencia de la captación y calidad del agua.
- **Sistema de conducción (o de tubería):** Usualmente consisten en una red de tuberías y bajadas que dirigen el agua recolectada por el captador al tanque de almacenamiento. La red debe de estar diseñada de acuerdo con el rango de descarga de agua que se espera captar. Esta parte puede incluir elementos de limpieza que mejoren la calidad de agua que se deposita en el tanque de almacenamiento.
- **Sistema de almacenamiento:** En esta parte se almacena toda el agua captada y normalmente es el componente más costoso del sistema. El tanque debe ser capaz de almacenar toda el agua que se espera recolectar en un periodo de tiempo dado.

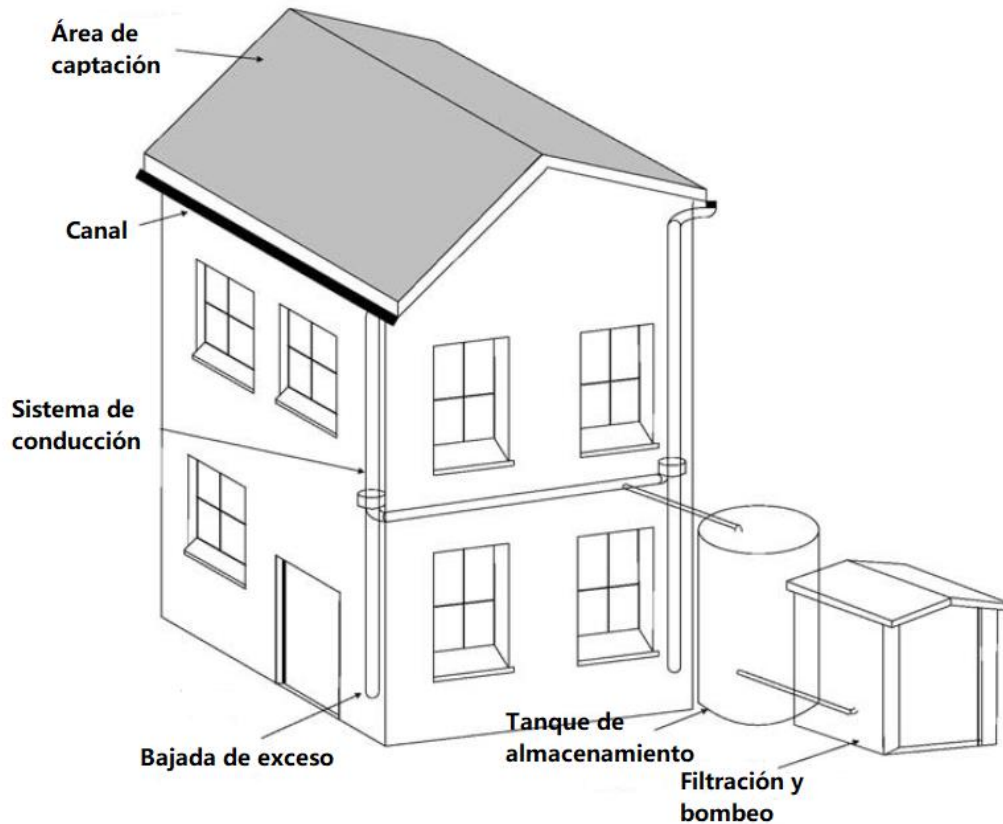


Figura 3.3. Esquema general de un sistema de cosecha de lluvia doméstico (Li *et al.*, 2010)

De acuerdo con Li *et al.* (2010), emplear sistemas de cosecha de lluvia proporciona diversos beneficios, tales como:

- El agua de lluvia es consumida en, o cerca, al punto de captación. Lo cual reduce el riesgo de contaminación durante su transporte y un menor costo de suministro.
- El volumen de agua demandado en una construcción o comunidad puede ser abastecida a partir de una adopción generalizada de sistemas de este tipo.
- Los sistemas de cosecha de lluvia son flexibles respecto a su instalación en construcciones nuevas o ya existentes.
- El costo de operación y mantenimiento es generalmente bajo.
- La construcción se vuelve autosuficiente cuando el suministro público de agua es interrumpido.
- Funcionan como sistemas preventivos de almacenamiento de agua para controlar y reducir riesgos potenciales de inundación.

La captación de cosecha de lluvia depende de la superficie tributaria y el material de la superficie (Campisano & Modica, 2012). El tipo de material es un factor importante en este tipo de sistemas ya que el sistema de captación suele estar expuesto a los rayos del sol. La exposición del material genera un calentamiento en la superficie que al presentarse la ocurrencia de precipitación una fracción de la lluvia es evaporada hasta que la temperatura del material reduce sustancialmente (SEMARNAT, 2016). Por ello es necesario, definir un coeficiente de escurrimiento que permita contemplar estas pérdidas por evaporación en el sistema de cosecha de lluvia (Fonseca, 2017).

Debido a la naturaleza de estos sistemas, su eficiencia es afectada principalmente por los patrones de distribución de la lluvia a lo largo del año. Por ello, se emplea un enfoque probabilístico durante el diseño de estos sistemas para estimar la lámina de precipitación esperada y, por ende, el volumen de agua disponible en función del área de captación disponible y los registros de precipitación en la zona de estudio (Su *et al*, 2009; Imteaz *et al*, 2011; Zamora, 2015).

3.3. Dinámica de Fluidos Computacional

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es un conjunto de métodos numéricos aplicados para obtener soluciones aproximadas a problemas de la mecánica de fluidos y transferencia de calor (Zikanov, 2010). La CFD no es una ciencia por sí misma, sino que es la aplicación de los métodos de una disciplina (métodos numéricos) dentro de otra (transferencia de calor y masa). Los modelos de CFD permiten identificar propiedades locales en la dinámica del fluido, y, por lo tanto, entender su comportamiento que permiten comprender la inferencia de la geometría en determinados elementos y cuantificar el impacto de modificaciones en el rendimiento de un sistema (Sourari & Hassairi, 2013). Los modelos empleados en CFD se basan en las ecuaciones de conservación de masa (ecuación 3.3), *momentum* (ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6) y energía (ecuación 3.7) para un flujo compresible, las cuales son ecuaciones diferenciales parciales derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes (Gupta *et al*, 2016).

La forma general de dichas ecuaciones en coordenadas cartesianas es:

- Conservación de masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

- Cantidad de movimiento (*momentum*)

$$Mx \quad \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(u)}{\partial z^2} \quad (3.4)$$

$$My \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(v)}{\partial z^2} \quad (3.5)$$

$$Mz \quad \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2(w)}{\partial z^2} \quad (3.6)$$

• Energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.7)$$

Donde:

x, y, z : Ejes del sistema coordenado

u, v, w : Componentes radial, tangencial y vertical del vector velocidad

ρ : Densidad del fluido

p : Presión absoluta

T : Cantidad de calor del fluido

C_p : Calor específico del fluido

λ : Conductividad térmica del fluido

ν : Viscosidad cinemática del fluido

Las ecuaciones de Navier-Stokes poseen cuatro variables desconocidas: p, u, v y w . Donde, considerando la ecuación de continuidad para flujo incompresible (ecuación 3.7) se forma un sistema de cuatro ecuaciones en función de las variables a estimar.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

De acuerdo con la NASA (2015), el proceso general para uso y aplicación de un análisis mediante CFD este compuesto por 12 pasos:

1. **Formulación del problema:** En esta etapa se describe el objeto de análisis y las rutas para alcanzar dicho objetivo. Dicho análisis debe considerar el dimensionamiento espacial (unidimensional, bidimensional o tridimensional) del fenómeno de interés, la temporalidad, la naturaleza del flujo, etc.
2. **Modelo geométrico y dominio del fluido:** Se establece la geometría (generalmente se hace uso de un software tipo CAD para la generación de la geometría) para determinar simplificaciones que permitan

optimizar el análisis. La geometría delimita los límites del dominio finito sobre el cual el flujo será analizado.

3. **Establecimiento de las condiciones iniciales y de frontera:** A partir de la definición del dominio del fluido, las condiciones físicas son requeridas en las fronteras del dominio. Posteriormente, la simulación inicia a partir de una solución inicial y emplea un método iterativo para alcanzar el estado final del flujo como solución.
4. **Generación de malla:** El dominio del fluido definido anteriormente se somete a un proceso de discretización mediante elementos o volúmenes finitos, según sea el análisis por realizar. La definición de estructura, topología y zonas de especial interés del flujo son factores que considerar en el proceso de discretización.
5. **Establecimiento de estrategias de simulación:** Las estrategias de simulación definen aspectos como espacio y tiempo. Los aspectos se refieren a la evolución de las propiedades del fluido (temperatura, presión, densidad, velocidad, etc.) a través de las dimensiones independientes (coordenadas espaciales y el tiempo).
6. **Definición de parámetros de entrada:** Un código de CFD genera un archivo de entrada creado a partir de una lista de valores de parámetros iniciales que correspondan con la estrategia definida anteriormente. Adicionalmente, el archivo de la malla contiene la configuración y las condiciones de frontera que son requeridas para el proceso y generar la solución inicial del flujo y definir, posteriormente, la solución del dominio completo.
7. **Ejecución de la simulación:** La simulación es ejecutada con varias posibles opciones para el procesamiento interactivo o de lotes y/o con procesamiento distribuido. La rapidez con la que la simulación es realizada depende directamente de la capacidad del equipo.
8. **Monitoreo de la simulación:** El proceso de simulación debe ser monitoreado para asegurar si se ha obtenido una “convergencia”, conocida como convergencia iterativa. La base principal de esta etapa está en alcanzar la minimización de error de solución mediante un número determinado de iteraciones, pero al mismo tiempo, satisfacer los modelos matemáticos implícitos en el software.
9. **Análisis de resultados:** Considera la evaluación de las propiedades físicas estimadas por el programa posterior a la simulación (velocidad, presión, empuje, turbulencia, etc.). El análisis de resultados permite visualizar el comportamiento del fluido de acuerdo con los escenarios planteados previamente.

10. **Comparación de resultados:** Los resultados obtenidos por medio del software son analizados y comparados con respecto a evaluaciones analíticas y/o experimentales para validar los datos obtenidos.
11. **Retroalimentación del proceso y análisis de sensibilidad:** La validez de los resultados obtenidos por el programa deben ser examinados para identificar posibles diferencias en la precisión de los datos y del rendimiento del software respecto a diversos factores, tales como: condiciones de flujo, turbulencia, condiciones de frontera, topología de la malla, densidad del fluido, entre otros aspectos.
12. **Documentación de resultados:** Se realiza la redacción de las conjeturas posterior al análisis y comparación de resultados donde se describen los pasos realizados durante el proceso de simulación.

La solución de estos problemas con geometrías y condiciones de frontera complejas se facilita mediante la aplicación de eficientes técnicas de solución numérica y la habilidad de procesamiento de sistemas computacionales (Bates *et al*, 2005). Con respecto a turbomáquinaria, la CFD permite simular el comportamiento del fluido a través de los diferentes elementos de una turbina o bomba, según sea el caso. La simulación de estos dispositivos mediante CFD permite observar fenómenos tales como: cavitación, golpe de ariete, erosión, turbulencia, etc.

CAPITULO 4. METODOLOGÍA

La metodología propuesta abarca los aspectos fundamentales que la investigación debe cubrir de acuerdo con las pretensiones que se establecieron al inicio del proyecto. La Figura 4.1 muestra el diagrama de flujo correspondiente a la metodología para el desarrollo de la micro central hidroeléctrica que opera a partir de la cosecha de lluvia. Esta metodología está conformada por 7 etapas, desde la descripción general de turbinas hasta la evaluación por retorno social de inversión (SROI) del sistema.

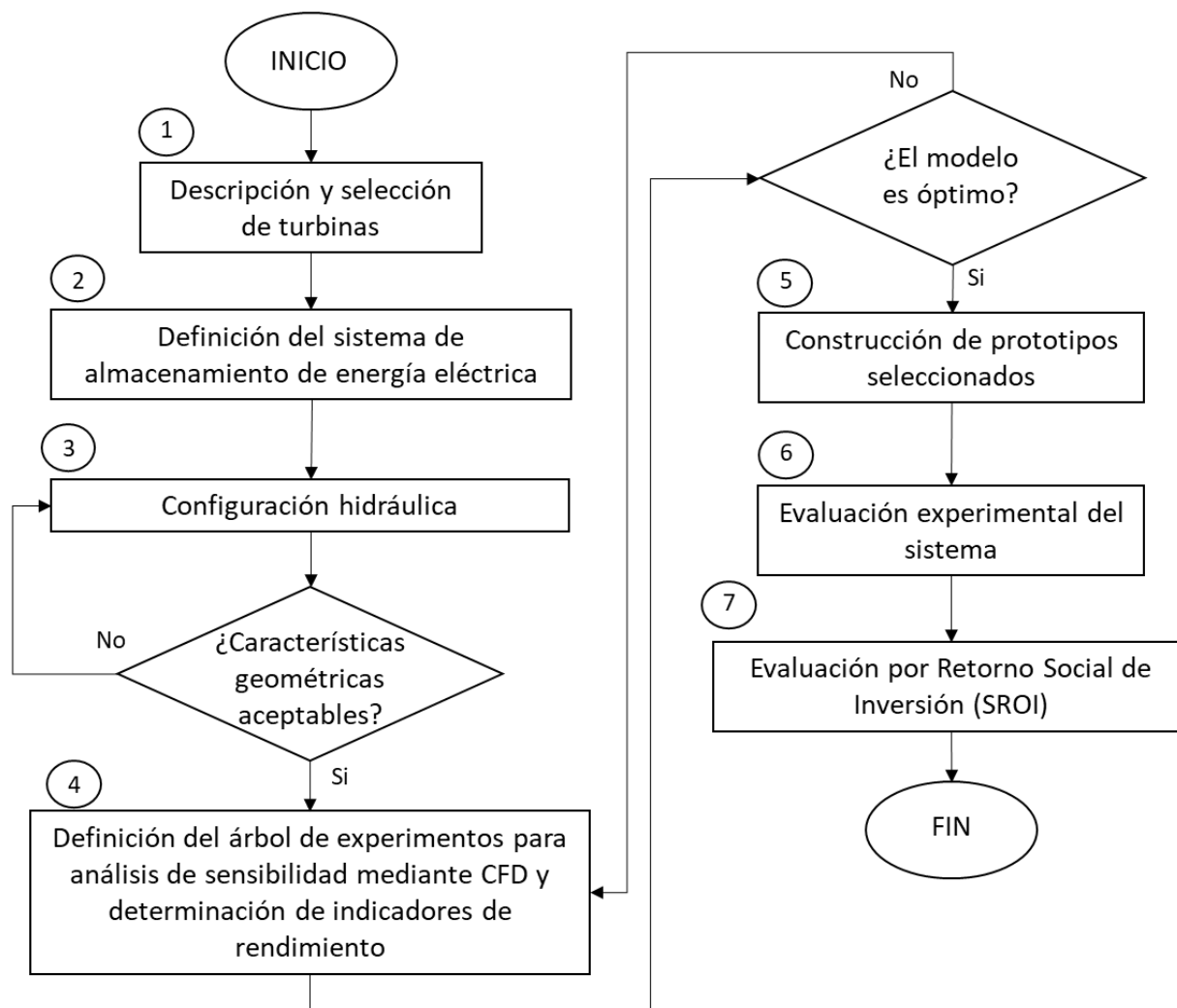


Figura 4.1. Metodología para la construcción de una micro central hidroeléctrica a partir de la cosecha de lluvias en zonas urbanas.

La comparación de resultados permitió verificar la selección de geometría de la turbina por medio de un análisis de sensibilidad realizado mediante un software especializado en Dinámica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics-CFD*) y que como resultado definió un sistema para la generación de energía eléctrica con base en la captación de agua de lluvia.

4.1. Descripción y selección de turbinas

La primera etapa del proyecto consistió en seleccionar entre diferentes alternativas, un tipo de turbina. De acuerdo con Mataix (2008), las turbinas se clasifican en dos grupos: turbinas de acción o impulso y de reacción. Las turbinas de acción o de impulso se caracterizan por trabajar con flujo tangencial con uno o más chorros de agua, donde cada chorro es acelerado por una boquilla externa a la turbina (Fox *et al.*, 2002). Las turbinas de reacción pueden trabajar mediante flujo axial o diagonal (mixto) en un espacio cerrado a presiones por encima de las condiciones atmosféricas (Potter, 2002, p. 559). Las turbinas Pelton son de acción y las turbinas Francis y Kaplan son de reacción (Figura 3.2).

Dixon (2005) argumenta que, la selección de turbinas se basa principalmente en las condiciones de operación como la carga hidráulica y el gasto disponible. Los diagramas de turbinas y regímenes de operación muestran las diferentes condiciones a las que puede operar cada turbina con mayor eficiencia. Por ejemplo, la turbina tipo Pelton muestra una mayor capacidad de trabajar con cargas hidráulicas altas y caudales bajos. Mientras que, las turbinas tipo Kaplan y Francis son idóneas para trabajar con caudales altos y menores valores de carga hidráulica.

Los criterios para la selección de la turbina son maximizar el volumen de agua captado por el sistema de cosecha de lluvias y el aprovechamiento de la carga hidráulica proporcionada por la infraestructura donde se encuentra instalada el sistema. Aunado a esto, se consideró la presencia de flujos intermitentes (variación de impulsos y velocidad), un mínimo mantenimiento de la turbina y la facilidad para modificar la infraestructura como criterios para la selección de turbina. Considerando los criterios mencionados y las características de los diferentes tipos de turbinas hidráulicas se puede inferir que la turbina que cumple los estándares definidos es la turbina tipo Pelton.

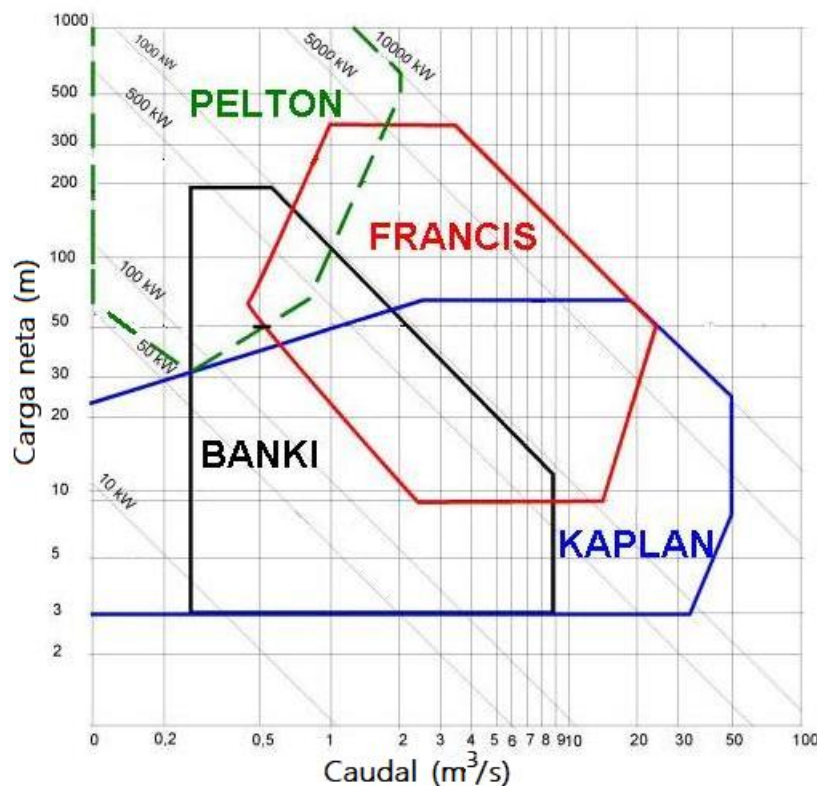


Figura 4.2. Diagrama de turbinas y sus regímenes de operación (Hydro Power, 2017)

4.2. Definición del sistema de almacenamiento de energía eléctrica

En la etapa 2 se estableció la estructura de los sistemas de generación de energía eléctrica y de almacenamiento. En esta etapa se identificaron y analizaron restricciones operativas para la etapa de diseño. Las restricciones permiten establecer condiciones mínimas y máximas de operación.

El sistema de generación se propuso mediante un generador eléctrico que opera con corriente directa (DC) y de tipo asíncrono (Figura 4.3). El sistema de generación establece las condiciones mínimas de operación; debido a que determina el valor de torque T ($N \cdot m$) y la velocidad angular ω_{turb} (rpm) mínimos necesarios para generar energía eléctrica. Para fines prácticos del proyecto se planteó el uso de un generador utilizado normalmente en aerogeneradores (turbinas eólicas) utilizando como fluido de trabajo el agua captada por el sistema de cosecha de lluvia.



Figura 4.3. Generador eléctrico asíncrono de corriente directa (Missouri Wind and Solar,2019)

Por otro lado, el sistema de almacenamiento permite preservar la energía producida. Debido a la naturaleza del sistema de trabajar con la acumulación de la lámina de precipitación, se emplea un equipo similar a los utilizados en sistema de energía fotovoltaicos (Figura 4.4), esto es, un sistema de baterías aislado de la red eléctrica. Sin embargo, para este caso, inicialmente se desconocía la eficiencia y la producción de energía por lo que se planteó utilizar una batería con una capacidad de almacenamiento de 22 Ah y un voltaje de operación de 12 V.

La adición de elementos en el sistema eléctrico suele incluir un controlador para la regulación de voltaje y protección de las baterías. Es importante mencionar, que a diferencia de un sistema tradicional de energía fotovoltaica que opera con un inversor, la micro central hidroeléctrica no requiere dicho elemento ya que el generador eléctrico seleccionado en el desarrollo de este trabajo opera a partir de corriente eléctrica directa (CD) y es suficiente para su almacenamiento en baterías. Por lo que no fue necesaria la instalación de un inversor cuya función es convertir la corriente directa en alterna (CA).

La estructuración del sistema de generación y almacenamiento de energía permite establecer condiciones mínimas de funcionamiento para el diseño de la turbina, principalmente impuestas por el generador eléctrico como el torque y el número de revoluciones mínimos de operación. Los valores de torque y revoluciones por minuto son variables necesarias para la estimación del diámetro de la turbina.

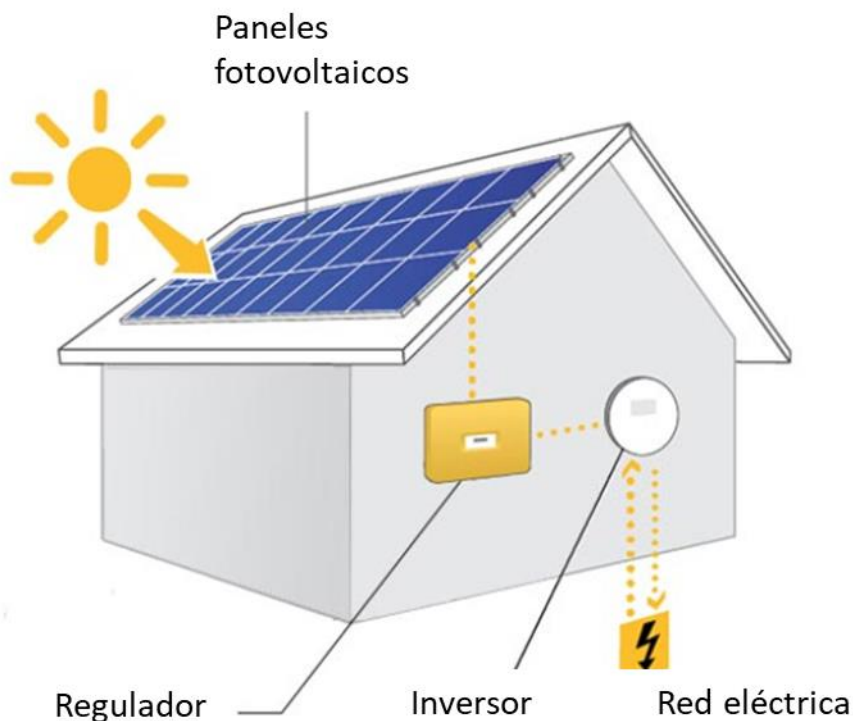


Figura 4.4. Configuración eléctrica en un sistema de energía fotovoltaico

Las condiciones máximas están determinadas por la disponibilidad de agua obtenida por la cosecha de lluvia. Un análisis estadístico empleando una función de distribución de probabilidad (f.d.p.) normal (ecuación 4.1; Figura 4.5) con los registros de lámina de precipitación acumulada durante el periodo de lluvias (Mayo-Octubre) de la zona en los últimos 50 años permitió conocer los valores de lámina esperados. El intervalo de confianza sobre el eje de la variable (cuantil) a partir de las probabilidades se propone para tres escenarios: mínimo ($P(X \leq x) = 0.2$), medio ($P(X \leq x) = 0.5$) y máximo ($P(X \leq x) = 0.8$); donde la f.d.p. depende de los datos x_i , su media \bar{x} y la desviación estándar σ (Walpole *et al.*, 2012). Los valores de precipitación P_i [mm] obtenidos del análisis estadístico representan una lámina de precipitación acumulada diaria en la zona de estudio.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{1}{2}\right)\left[\frac{(x-\bar{x})}{\sigma}\right]^2} \quad (4.1)$$

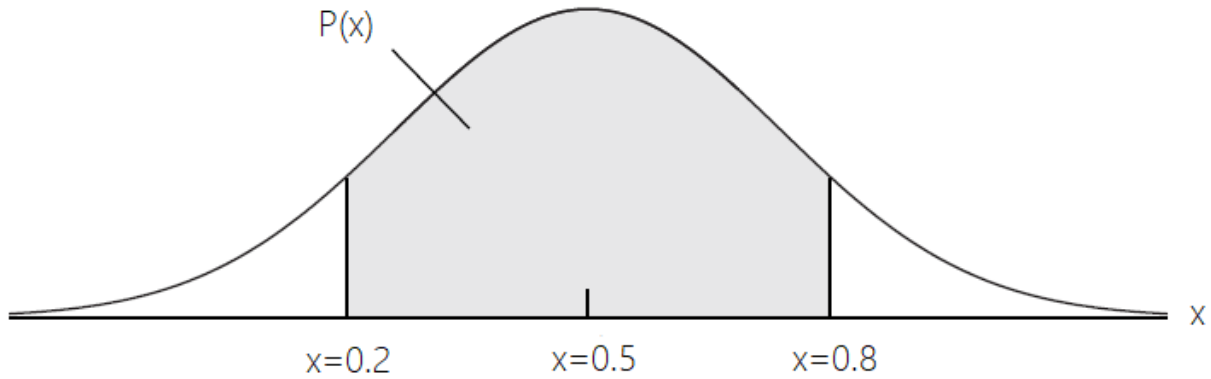


Figura 4.5. Gráfica de función de distribución normal (Navidi, 2006)

El volumen esperado V_i [m^3] para cada escenario se obtuvo mediante la ecuación 4.2, de acuerdo con los valores de precipitación P_i [mm] obtenidos del análisis de probabilidad, el área de captación disponible o tributaria A_t [m^2] y un coeficiente de escurrimiento C_e de 0.8 (SEMARNAT, 2016).

$$V_i = P_i \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \cdot A_t \cdot C_e \quad (4.2)$$

Posteriormente, se estimó la carga hidráulica esperada H_i [m] como el cociente entre el volumen esperado V_i [m^3] y la sección transversal de la tubería de bajada $A_{bajada} = \frac{\pi \cdot \phi_{tub}^2}{4}$ (ecuación 4.3). El valor de carga H_i obtenido permite estimar una columna de agua equivalente al volumen captado por el sistema de cosecha de lluvia de acuerdo con el diámetro de tubería implementado ϕ_{tub} .

$$H_i = \frac{V_i}{A_{bajada}} \quad (4.3)$$

4.3. Configuración hidráulica del sistema

En configuración hidráulica (etapa 3) se propuso y evaluaron las características geométricas de la bajada del sistema. Por ejemplo, el diámetro de tubería ϕ_{tub} [in], diámetro del chorro a la salida d_{jet} [in] y el número y las dimensiones geométricas de la(s) boquilla(s). Los valores obtenidos con dichos parámetros definieron posteriormente la caracterización y dimensionamiento de la turbina. El objetivo de la configuración hidráulica fue evaluar y optimizar las características de la bajada en función de los alcances del sistema de cosecha de lluvia (lamina de precipitación esperada P_i y el tiempo de descarga $t_{descarga}$)

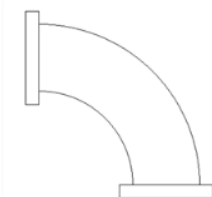
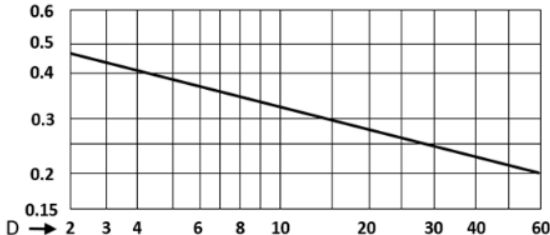
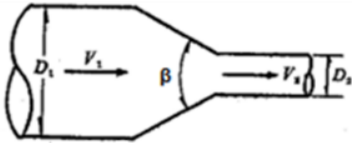
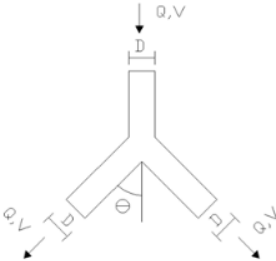
La primera parte de esta etapa consiste en estimar el caudal esperado $Q_{esp} \left[m^3/s \right]$ a la salida de la boquilla a partir de la ecuación de la energía para una vena líquida (Sotelo, 2002; ecuación 4.4) entre la altura del área de captación y la posición de la(s) boquilla(s).

$$Q_{esp} = A_{jet} \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H_T}{1 - \left(\frac{A_{jet}}{A_{bajada}} \right)^2 + \frac{\sum f_i L_i}{\phi_{tub}} \left(\frac{A_{jet}}{A_i} \right)^2 + \sum k_j \left(\frac{A_{jet}}{A_j} \right)^2}} \quad (4.4)$$

Donde g es la constante de gravitación universal $\left[m/s^2 \right]$, A_{jet} es la sección transversal a la salida de la bajada $[m^2]$, f es el factor de fricción del conducto, L_i es la distancia entre secciones $[m]$ y k es el coeficiente de pérdidas locales que depende del tipo y tamaño de la obstrucción. Las pérdidas locales de energía se expresan como una fracción de la carga de la velocidad del fluido (White, 2002). Sotelo (2002) proporciona valores para el coeficiente de pérdidas k_j de acuerdo con el tipo y tamaño de la obstrucción (Tabla 4.1). Por otro lado, el valor del coeficiente de fricción es desconocido, por lo que se considera una condición inicial de flujo laminar para la estimación de un caudal inicial $Q_0 \left[m^3/s \right]$ que sirve para identificar un primer valor cercano a k , el proceso se repite hasta que se obtiene un error aceptable $e = 0.01$.

Inicialmente, el Número de Reynolds Re_j y el factor de fricción en la tubería f_i son desconocidos, por lo que no es posible tener una estimación fiable del caudal esperado Q_{esp} de forma directa. Se supone flujo laminar (se desprecia las pérdidas por fricción presentes en la bajada del sistema de cosecha de lluvia) para una primera estimación del valor de caudal. Posteriormente, obtenido el primer valor de caudal Q_0 se da inicio a un proceso iterativo para estimar el valor del caudal esperado Q_{esp} considerando los efectos de las pérdidas por fricción debido al material de la tubería. La Figura 4.6 muestra el diagrama de flujo del proceso para estimar el valor de Q_{esp} .

Tabla 4.1. Factores de pérdidas locales según el tipo de obstrucción.

Tipo de pérdida	Esquema																												
Pérdida por cambio de dirección	<div><p>$r = \pm 35\%$</p><p>Codo regular de 90° con bridas</p></div> <div><p>$D \rightarrow$ 2 3 4 6 8 10 20 30 40 60</p></div>																												
Pérdida por reducción de área	<p>Supeditado por el ángulo β de acuerdo con la tabla de Kisieliev.</p> <table><tr><th>β</th><th>4 a 5°</th><th>7°</th><th>10°</th><th>15°</th><th>20°</th><th>25°</th><th>30°</th><th>35°</th><th>40°</th><th>45°</th><th>60°</th><th>75°</th><th>80°</th></tr><tr><td>K</td><td>0.060 0.005</td><td>0.16</td><td>0.16</td><td>0.18</td><td>0.2</td><td>0.22</td><td>0.24</td><td>0.26</td><td>0.28</td><td>0.3</td><td>0.32</td><td>0.34</td><td>0.35</td></tr></table> <div></div>	β	4 a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°	K	0.060 0.005	0.16	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.35
β	4 a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°																
K	0.060 0.005	0.16	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32	0.34	0.35																
Perdidas por bifurcación	<div></div> <div><table><tr><th>θ</th><th>K_a</th><th>$K_{a'}$</th></tr><tr><td>10°</td><td>0.1</td><td>0.4</td></tr><tr><td>30°</td><td>0.3</td><td>1.2</td></tr><tr><td>45°</td><td>0.7</td><td>2.8</td></tr><tr><td>60°</td><td>1.0</td><td>4.0</td></tr><tr><td>90°</td><td>1.4</td><td>5.6</td></tr></table></div>	θ	K_a	$K_{a'}$	10°	0.1	0.4	30°	0.3	1.2	45°	0.7	2.8	60°	1.0	4.0	90°	1.4	5.6										
θ	K_a	$K_{a'}$																											
10°	0.1	0.4																											
30°	0.3	1.2																											
45°	0.7	2.8																											
60°	1.0	4.0																											
90°	1.4	5.6																											

Referencia: Sotelo (2002)

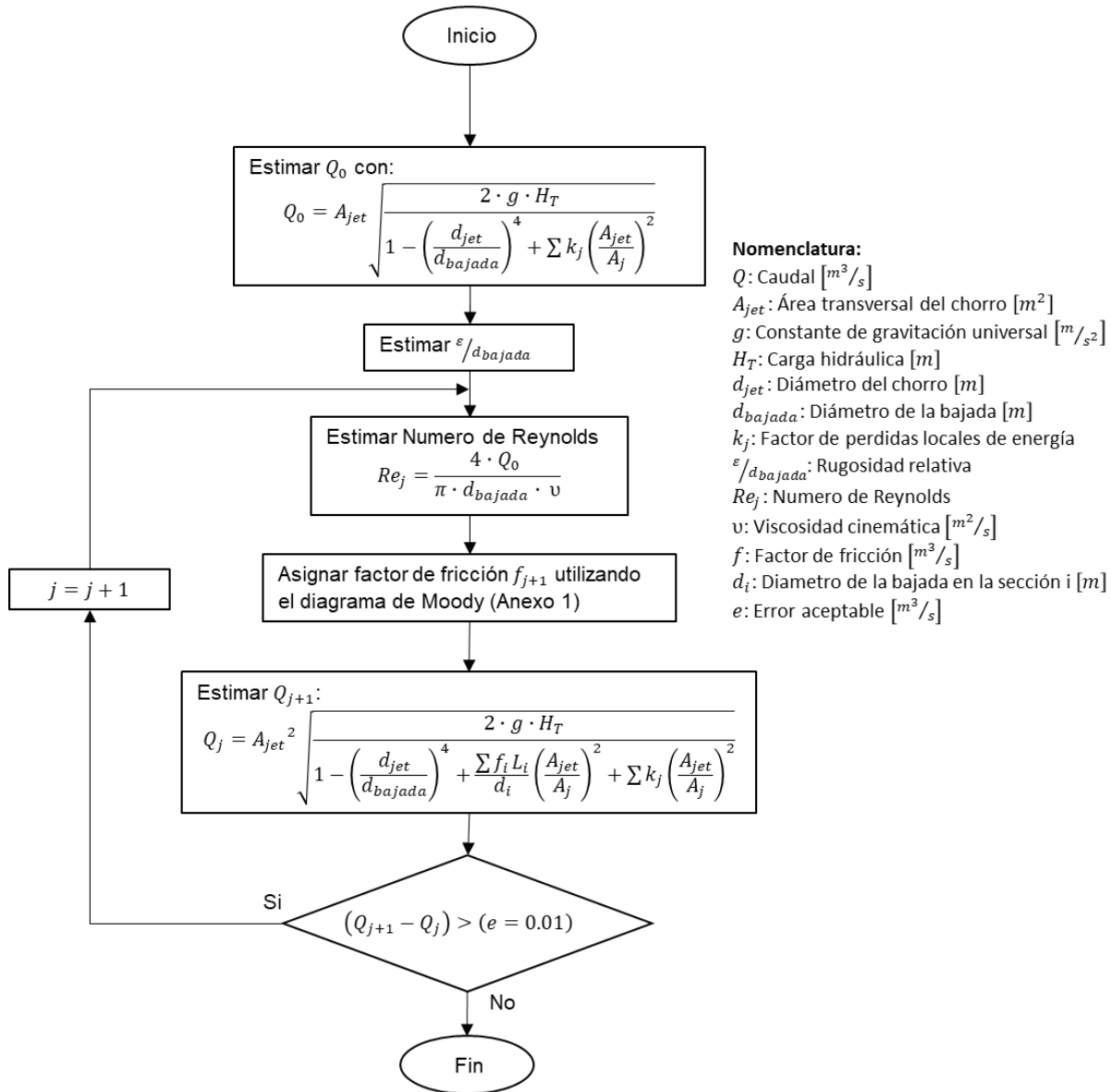


Figura 4.6. Diagrama de flujo del proceso iterativo para estimar el caudal de salida Q_{esp}

El tiempo de descarga (ecuación 4.5) se estimó como el cociente entre el volumen esperado V_i y el caudal suministrado $Q_{sum} [m^3/s]$. Este último parámetro, depende del número de boquillas n_{nozzle} instaladas (ecuación 4.6). El tiempo de descarga es un indicador del tiempo estimado de operación de la turbina en función de la lámina de precipitación y la intensidad del evento. A mayores valores de lámina y de intensidad se espera un tiempo más prolongado de operación y por ende una producción mayor de energía eléctrica. El tiempo de descarga permite estimar si el sistema de acumulación y el número de boquillas son suficientes para mantener el agua captada en la tubería mientras el evento ocurre sin la posibilidad de que se genere un desbordamiento en la parte superior del tubo.

$$t_{descarga} = \frac{V_i}{Q_{sum}} \quad (4.5)$$

$$Q_{sum} = Q_{esp} \cdot n_{nozzle} \quad (4.6)$$

La boquilla tiene como función principal, convertir la energía potencial de la carga hidráulica en energía cinética mediante un chorro presurizado de alta velocidad hacia la turbina (White, 2011). La caracterización geométrica de la boquilla se encuentra en función del diámetro del chorro d_{jet} propuesto. De acuerdo con Nechleba (1957), la caracterización se realiza a partir de ecuaciones empíricas en función del producto del diámetro de chorro d_{jet} y coeficientes empíricos obtenidos de la experimentación de distintos parámetros geométricos evaluados en trabajos previos. Los coeficientes poseen umbrales con una correlación respecto a la disminución de pérdidas por energía cinética en el cuerpo de la boquilla durante el transito del flujo. La Figura 4.7 muestra el perfil de una boquilla con los coeficientes para una turbina de tipo Pelton.

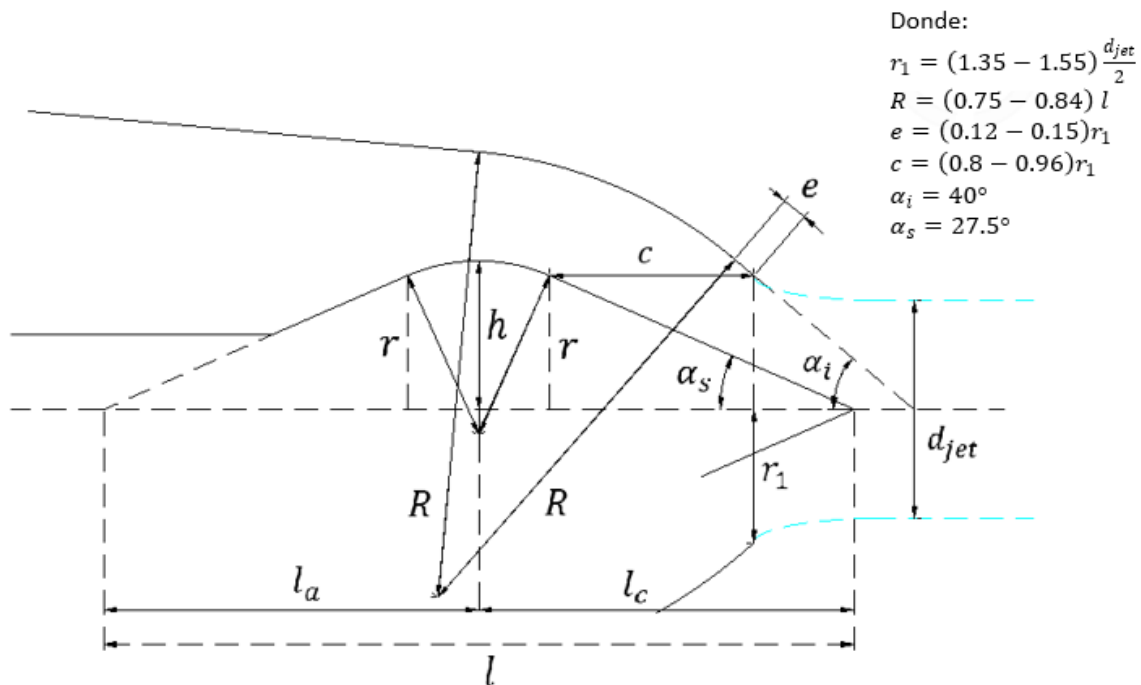


Figura 4.7. Perfil de boquilla para una turbina tipo Pelton (Nechleba, 1957)

La evaluación de factibilidad de la bajada se realizó empleando como criterios: el tiempo de descarga en los escenarios esperados, la presencia de turbulencia a partir del análisis numérico en la bajada, la energía cinética esperada del chorro a la salida de la boquilla y la necesidad de adicionar elementos para su operación, tales como: ejes, engranes, sistemas electromecánicos, entre otros. Además, de un análisis del

comportamiento del flujo a través de bajada mediante el software ANSYS-Fluent™ (ANSYS, 2018) bajo condiciones de operación esperados (condiciones de frontera, p.e. carga hidráulica y flujo volumétrico a la entrada) y comparación de resultados.

4.4. Definición del árbol de experimentos para análisis de sensibilidad mediante CFD y determinación de indicadores de rendimiento

La etapa 4, busca evaluar el comportamiento del fluido a través de la turbina mediante la variación de distintos parámetros geométricos bajo distintas condiciones de operación para establecer la geometría optima del dispositivo (NASA, 2015; Alnakhlani *et al.*, 2015). La primera parte de esta etapa consiste en el diseño y la caracterización geométrica de la turbina (diámetro de rodete, cazoletas, etc.). Los parámetros geométricos son relaciones empíricas y/o analíticas usadas para caracterizar la geometría de las turbinas (Atthanayake, 2009).

El diámetro de la turbina puede ser estimado mediante la ecuación de cantidad de movimiento angular para flujo permanente (Fox & McDonald, 2002) y relacionando los polígonos de velocidad para una turbina tipo Pelton (ecuación 4.7; Figura 4.8), donde T es el torque mínimo de operación ($N \cdot m$), ρ es la densidad del fluido [kg/m^3], Q_{sum} es el caudal suministrado, r_{turb} es el radio de la turbina (m), V_{jet} es la velocidad del chorro a la entrada de la cazoleta (m/s), U es la velocidad tangencial de la cazoleta (m/s) siendo el producto de la velocidad angular alcanzada por la turbina ω_{turb} y el radio de la turbina r_{turb} y β_2 es el ángulo de desviación del chorro a través de la cazoleta (Dixon, 2005). La ecuación resultante es una ecuación de segundo grado en función del radio de la turbina r_{turb} .

$$T = \rho \cdot Q_{sum} \cdot r_{turb} \cdot (V_{jet} - U)[1 - \cos \beta_2] \quad (4.7)$$

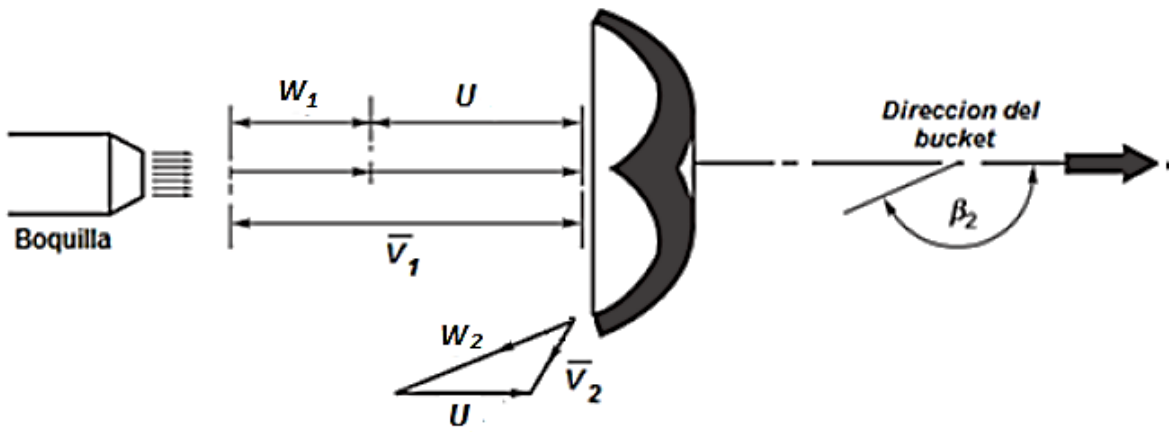


Figura 4.8. Diagrama de la entrada del flujo a una cazoleta de una turbina Pelton (Dixon, 2005, p. 296)

Donde la velocidad tangencial U y la velocidad de salida del chorro V_{jet} pueden estimarse mediante las ecuaciones 4.8 y 4.9, respectivamente.

$$U = \omega \cdot r_{turb} \quad (4.8)$$

$$V_{jet} = \frac{Q_{sum}}{A_{jet}} = \frac{4 \cdot Q_{sum}}{\pi \cdot d_{jet}^2} \quad (4.9)$$

Definido el proceso para estimar el radio de la turbina, la caracterización geométrica de las cazoletas se puede realizar de acuerdo con perfiles propuestos por diversos autores (Nechleba, 1957; Atthanayake, 2009; Rai *et al.*, 2016). La mayor parte de los parámetros geométricos de la cazoleta se encuentran en función del diámetro del chorro a la salida de la boquilla. La caracterización de los parámetros geométricos de las cazoletas es un paso fundamental en el diseño de la turbina para optimizar la eficiencia debido a las pérdidas por fricción que pudiesen generarse debido a las dimensiones de las longitudes y radios de curvatura (Gupta *et al.*, 2016). De acuerdo con Nechleba (1957), las cazoletas de tamaño menor proporcionan una mayor eficiencia con caudales bajos, mientras que cazoletas de mayor tamaño son ideales en turbinas con caudales altos. Lo cual, considerando que el caudal disponible en un sistema de cosecha de lluvia es limitado por el régimen de precipitación, se debería optar por una cazoleta de tamaño menor, según los valores de los coeficientes. Sin embargo, el análisis de sensibilidad mediante CFD realizado en esta investigación permite establecer si dicho concepto es válido. La Figura 4.9 muestra el perfil para la caracterización de una cazoleta de acuerdo con lo propuesto por Nechleba (1957). En este caso, al contemplar una evaluación de diferentes configuraciones geométricas se consideran valores base de cada parámetro. En este caso, los valores base serán los valores medios de los umbrales de coeficientes mostrados en el perfil mencionado.

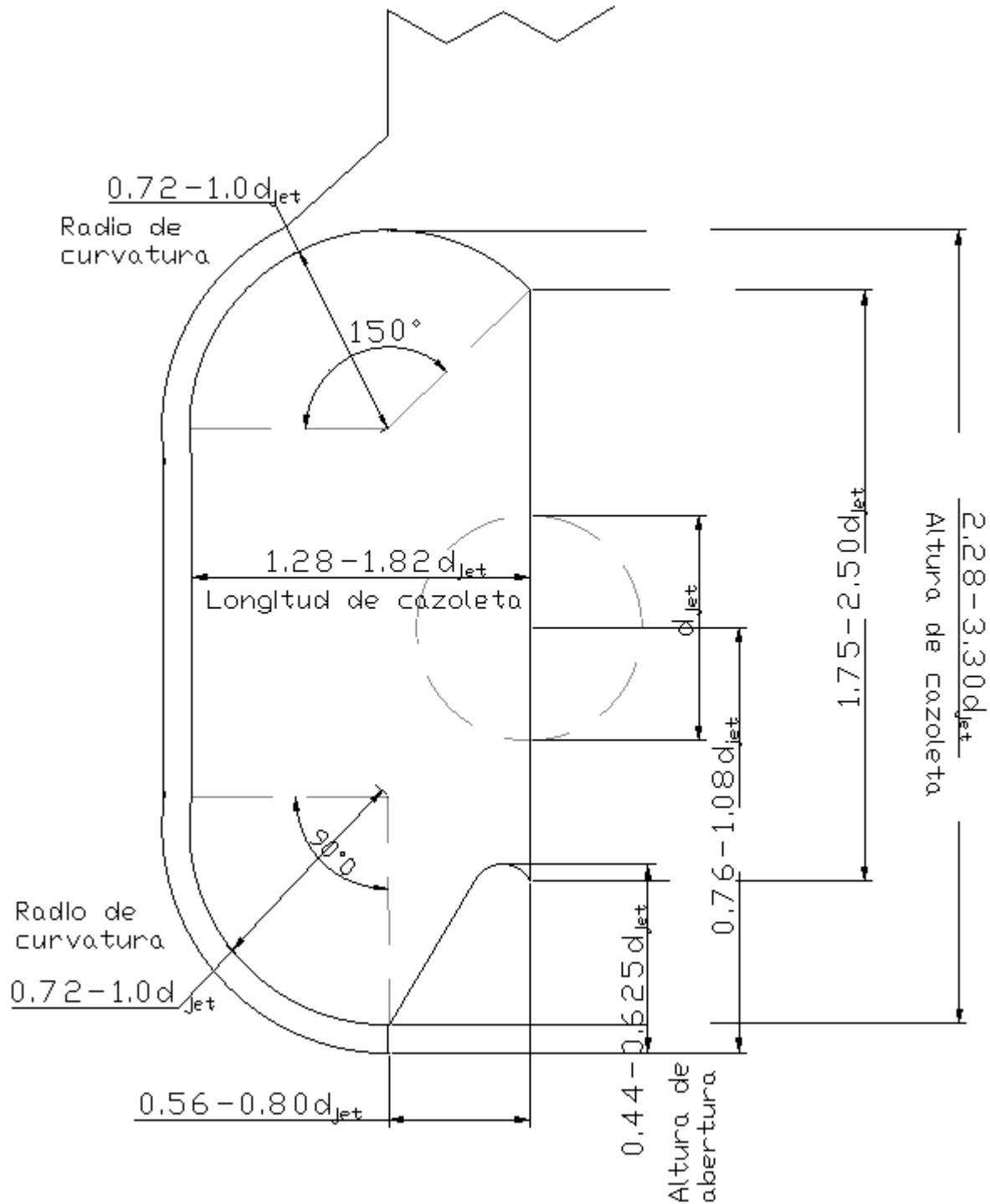


Figura 4.9. Perfil propuesto para la caracterización geométrica de una cazoleta (Nechleba, 1957; Atthanayake, 2009)

La modelación de la turbina se realizó mediante un software especializado de tipo CAD (*Computer-Aided Design*), por ejemplo, SolidWorks (SolidWorks Corporation, 2019). Como se mencionó en el capítulo 3, la

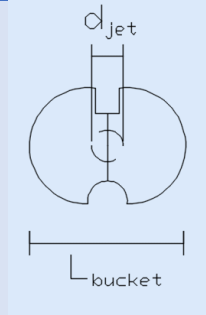
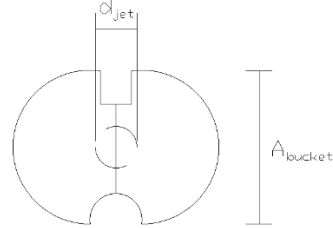
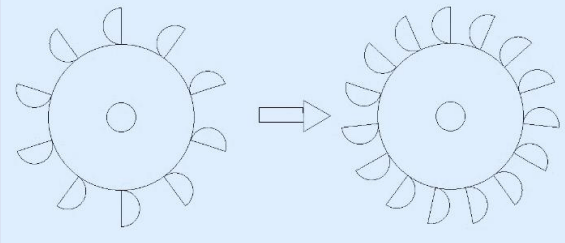
modelación de la geometría en un software de tipo CAD forma parte del proceso de simulación mediante CFD ya que define el dominio del fluido (NASA, 2015).

La definición del árbol de experimentos planteó la variación de parámetros geométricos para evaluar su impacto sobre la eficiencia. La variación de los parámetros geométricos permitió al análisis mediante CFD ofrecer un sustento teórico que garantiza la fiabilidad y validez de los resultados obtenidos en cada etapa de simulación (López, 2015). La Tabla 4.2 muestra los parámetros geométricos seleccionados para la realización del análisis de sensibilidad mediante CFD, así como sus respectivos indicadores de rendimiento y umbrales de evaluación.

El primero y segundo parámetros por evaluar son la longitud L_{bucket} y altura de la cazoleta A_{bucket} . Dichos parámetros poseen una importante inferencia en el rendimiento de la turbina. La relación entre ambos parámetros se halla en la distribución del chorro a través de la superficie de la cazoleta. Una cazoleta con valores altos de estos parámetros representa una mayor superficie con la que interactúa el fluido e incrementa las pérdidas por fricción y la transmisión de energía se ve afectada (Gupta *et al.*, 2016; Atthanayake, 2009). Los umbrales propuestos por Nechleba (1957) son utilizados para definir el valor de cada parámetro. La acotación para cada umbral está propuesta en tres evaluaciones: 1) Valor mínimo del umbral, 2) Valor medio de los dos umbrales y 3) Valor máximo del umbral. Así, la caracterización geométrica posee tres valores propuestos para el análisis y caracterización geométrica.

El tercer parámetro es el número óptimo de cazoletas en el rotor de la turbina. Tradicionalmente, está la creencia de que entre mayor sea la cantidad de cazoletas adheridas al rotor de la turbina, mayor serán la adsorción de energía y el torque generado a la salida del eje. Sin embargo, este concepto no es un axioma dentro del campo de las turbomáquinas (Zidonis & Aggidis, 2016). Un número muy elevado de cazoletas impide la correcta transición entre cada elemento, lo cual evita que el fluido se distribuya apropiadamente en la superficie de la cazoleta y la transmisión de potencia es parcial. Por ello, es necesario evaluar la influencia de operar con números diferentes de cazoletas alrededor del rotor. El número de cazoletas, teóricamente, se puede estimar mediante ecuaciones empíricas obtenidas mediante experimentación propuestas por diversos autores tales como: Nasir (2013; ecuación 4.10), Einsering (1991; ecuación 4.11) y Nechleba (1957; ecuación 4.12). Es importante mencionar que, la ecuación propuesta por Nechleba (1957) no proporciona directamente el número de cazoletas. El valor obtenido es un índice de la relación entre el diámetro del chorro y el diámetro del rotor estimado para la turbina. A partir de dicha relación, se infiere un rango idóneo de cazoletas (Tabla 4.3).

Tabla 4.2. Lineamientos en la confección del árbol de experimentos para el análisis de sensibilidad

ID	Parámetro de diseño	Indicador de rendimiento	Umbrales	Representación gráfica
1	Longitud de la cazoleta	$k = \frac{w_2}{w_1}$	$1.28d_{jet} - 1.82d_{jet}$	
2	Altura de la cazoleta	$k = \frac{w_2}{w_1}$	$2.28d_{jet} - 3.3d_{jet}$	
3	Número de cazoletas	T	$17 - 33 \text{ Buckets}$	
Simbología: k : Pérdidas por fricción en de la cazoleta w_1 : Velocidad relativa a la entrada [m/s] w_2 : Velocidad relativa a la salida [m/s] d_{jet} : Diámetro de chorro [m] T : Torque generado [$N \cdot m$]				

Fuente: Elaboración propia con información de Dixon (2005), Fox & McDonald (2002) y White (2008)

$$N_{b1} = \frac{r_{turb}}{d_{jet}} + 15 \quad (4.10)$$

$$N_{b2} = \frac{\pi \cdot r_{turb}}{d_{jet}} \quad (4.11)$$

$$N_{b3} = \frac{d_{jet}}{2 \cdot r_{turb}} \quad (4.12)$$

Tabla 4.3. Selección del número de cazoletas según la relación diámetro de chorro y diámetro de turbina

$d_{jet} / 2 \cdot r_{turbina}$	N_{b3}
1/6	17 a 21
1/8	18 a 22
1/10	19 a 24
1/15	22 a 27
1/20	24 a 30
1/25	26 a 33

Los criterios de selección de geometría, para cada parámetro, recaen principalmente en los indicadores de rendimiento propuestos en la Tabla 4.2. Aquellas configuraciones con indicadores de mayor valor deben ser, en teoría, los óptimos. Sin embargo, es posible la presencia de diferencias significativas mínimas en los resultados obtenidos mediante ANSYS-Fluent. Por ello, se recomienda emplear una prueba de hipótesis estadística mediante la comprobación de medias de los resultados obtenidos a partir del planteamiento de hipótesis $\mu_1 - \mu_2 > 0$, la cual permite verificar la formulación de la hipótesis de acuerdo con la media poblacional μ y el intervalo de confianza establecido. De este modo, es posible determinar si los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad poseen diferencias significativas o no (Navidi, 2006).

Una prueba de hipótesis estadística es una aseveración o conjetura con respecto a una o más poblaciones. En este caso, se postula o conjetura acerca de la presencia de diferencias significativas entre los resultados para cada escenario (Walpole *et al.*, 2012). Para ello se compara el valor crítico de probabilidad t_c y el valor estadístico de prueba t_n , donde si $t_n > t_c$ se acepta la hipótesis planteada. El valor crítico de probabilidad (Anexo 2) se define en función del nivel de significancia α , para el presente caso considerar de 0.05, y el número de grados de libertad (ecuación 4.13), donde n representa el número de datos o de la población. Por otro lado, el valor estadístico de prueba t_n puede estimarse mediante la ecuación 4.14. Donde, \bar{d} es la media de las diferencias de los resultados de cierta geometría en los distintos escenarios

de operación, $\mu_1 - \mu_2$ es la diferencia de medias y $\frac{S_d}{\sqrt{n}}$ representa la desviación estándar de la diferencia o también conocido como error estándar.

$$gdl = n - 1 \quad (4.13)$$

$$t_n = \frac{\bar{d} - (\mu_1 - \mu_2)}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} \quad (4.14)$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (4.15)$$

5.5. Construcción de prototipos seleccionados

En primer lugar, la selección del material depende de su capacidad para trabajar bajo valores altos de esfuerzos y su resistencia al agua. Por ello, se propuso un análisis fluido-estructura (*FSI*; por sus siglas en inglés) para evaluar las posibles deformaciones y la concentración de esfuerzos en la turbina. Los resultados del análisis fueron analizados de acuerdo con el criterio de Von Mises, el cual se basa en determinar la energía de deformación en el material a partir de la energía asociada con la cambios en la forma del material (Hibbeler, 2012). En función del material propuesto y empleando el campo de presiones obtenido del análisis mediante CFD para la manufactura de los elementos y cuerpo de la turbina (rodete), se evalúa la relación material-deformación. Bajo este criterio, es posible seleccionar el material de manufactura adecuado. La Tabla 4.4 muestra las propiedades mecánicas de PLA (Acido Poli-Láctico) y ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno), dos de los materiales más utilizados en la impresión tridimensional y con utilidad en aplicaciones mecánicas, artísticas y médicas (3D Market, 2019).

Realizado el análisis *FSI*, los criterios de evaluación son la deformación y la concentración de esfuerzos en el cuerpo del modelo de acuerdo con el software. Si para ambos casos (PLA y ABS), la deformación ($\pm 0.1 \text{ mm}$ de deformación) y los esfuerzos son denotados como peligrosos según la escala del software, se puede modificar la geometría de los elementos para reducir la posibilidad de una fractura, principalmente el grosor de la pared de los elementos. Los cambios en la geometría pueden modificar el espesor de las paredes para aumentar la resistencia del modelo sin alterar el perfil definido del análisis de sensibilidad (Figura 4.9).

Tabla 4.4. Especificaciones de materiales usados en impresoras 3D.

Material	Propiedad Mecánica	Valor	Unidades
ABS	Densidad	1 300	$\frac{kg}{m^3}$
	Módulo de Young (Elasticidad)	2.8	GPa
	Relación de Poisson	0.35	-
	Punto de rendimiento a tensión	48.2	MPa
	Punto de rendimiento a compresión	65.0	MPa
PLA	Densidad	1 250	$\frac{kg}{m^3}$
	Módulo de Young (Elasticidad)	3.5	GPa
	Relación de Poisson	0.36	-
	Punto de rendimiento a tensión	35.9	MPa
	Punto de rendimiento a compresión	7.58	MPa

Fuente: 3D ALCHEMY, 2018.

4.6. Evaluación experimental del sistema

La evaluación del sistema (etapa 6) consistió en estimar la eficiencia alcanzada por el sistema para producir determinadas cantidades de energía eléctrica bajo diferentes escenarios. Para ello, es necesario un circuito electrónico para la lectura y el registro de parámetros como voltaje generado V_{gen} , la corriente eléctrica I_{gen} y el número de revoluciones por minuto de la turbina $\Omega_{turbina}$.

La primera parte de esta etapa consistió en la experimentación del modelo bajo diferentes escenarios posibles de operación definidos en la etapa 3. Los escenarios de operación se propusieron según los valores de caudal esperado Q_{esp} , el tiempo de descarga $t_{descarga}$, el caudal suministrado Q_{sum} (ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6, respectivamente) y la carga hidráulica esperada H_i (ecuación 5.3) según los escenarios de precipitación obtenidos del análisis estadístico.

La lectura y el registro de datos en la etapa de evaluación experimental se realizaron mediante un circuito electrónico diseñado exclusivamente para este propósito (Figura 4.10). El circuito consta de cuatro partes principales: a) microcontrolador, b) reloj de tiempo real y memoria SD para el registro de datos, c) un conjunto de sensores para la medición del número de revoluciones por minuto de la turbina y; d) la fuente de alimentación.

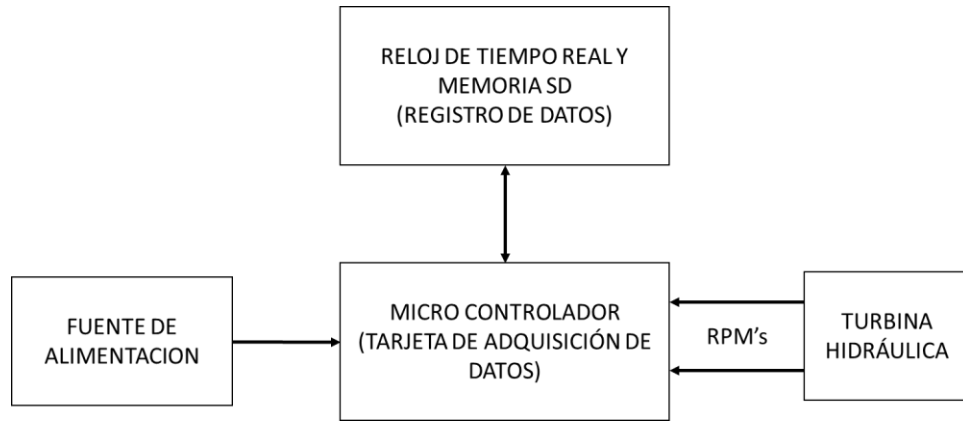


Figura 4.10. Esquema general del sistema electrónico para monitoreo de parámetros de operación.

La estimación de eficiencia se llevó a cabo en dos fases. La primera consistió en estimar la eficiencia de la turbina η_{turb} , también conocida como eficiencia hidráulica (ecuación 4.13; Dixon, 2005). Es decir, se estimó como el cociente entre la cantidad de energía que la turbina sustrae del movimiento del fluido \dot{W}_{turb} [W] y la energía potencial o teórica \dot{W}_{esp} [W] (ecuación 3.1). Donde, la cantidad de energía absorbida por la turbina es representada como el producto del torque generado \vec{T} (ecuación 5.7) y la velocidad angular ω_{turb} del rodete (Potter & Wiggert, 2002).

$$\eta_{turb} = \frac{\dot{W}_{turb}}{\dot{W}_{esp}} = \frac{\vec{T} \cdot \omega_{turb}}{\rho \cdot g \cdot H_T \cdot Q_{sum}} \quad (4.13)$$

Por otro lado, la eficiencia de producción de energía eléctrica η_{gen} (ecuación 4.14) puede ser estimada como el cociente del trabajo entregado por el rodete \dot{W}_{turb} [W] y la potencia eléctrica alcanzada a la salida del generador eléctrico \dot{W}_{gen} [W]. Donde, la potencia entregada por el generador se estima como el producto del voltaje alcanzado V_{gen} [V] y la corriente eléctrica generada I_{gen} [A].

$$\eta_{gen} = \frac{\dot{W}_{gen}}{\dot{W}_{turb}} = \frac{V_{gen} \cdot I_{gen}}{\vec{T} \cdot \omega_{turb}} \quad (4.14)$$

4.7. Evaluación por retorno social de inversión (SROI)

La última etapa, evaluación por retorno social de inversión (SROI, por sus siglas en inglés; Yates & Marra, 2016), compara los costos de construcción y operación del proyecto con los beneficios económicos, sociales y ambientales que pueda producir (Cooney, 2016). La evaluación fue realizada bajo condiciones medias de precipitación en la zona de estudio y en función del uso destinado a la energía generada. Adicionalmente, se consideraron a largo plazo, costos de mantenimiento, eficiencia de generador, vida

útil de baterías, reducción de emisión de gases de efecto invernadero y factores que puedan influir en el rendimiento del sistema.

El análisis SROI es un marco para medir y cuantificar el concepto de valor, en lugar del dinero. El análisis considera como se genera el cambio midiendo los resultados (*'outcomes'*) sociales, medioambientales y económicos, y usa términos monetarios para representar dichos *outcomes*. Esto permite calcular la relación costo-beneficio. Por ejemplo, un ratio de 3:1 indica que una inversión de \$1 genera \$3 de valor social (Grupo Civis, 2012).

El análisis SROI puede realizarse con un enfoque evaluativo o prospectivo (o de pronóstico). El análisis evaluativo es conducido retrospectivamente y basado en *outcomes* reales que ya han tenido lugar. El prospectivo o de pronóstico predice cuanto valor social será creado si las actividades alcanzan los *outcomes* esperados (Yates & Marra, 2016). Considerando esto, el tipo de análisis a realizar en este proyecto es de carácter prospectivo debido a que la micro central hidroeléctrica aún no cuenta con un marco tan amplio para evaluar *outcomes* de manera retrospectiva.

Watson *et al.* (2016) y grupo Civis (2012) mencionan que el proceso para llevar a cabo un análisis SROI está compuesto de 6 etapas:

1. **Establecer el alcance e identificar a los *stakeholders* clave:** Aquí se definen límites claros acerca de que cubrirá el análisis, quien y como estará involucrado en el proceso.
2. **Elaborar un mapa de *outcomes*:** Durante la interacción con sus *stakeholders* se elabora un mapa de impacto, o teoría del cambio, que muestra la relación entre *inputs*, *outputs* y *outcomes*.
3. **Evidenciar los *outcomes* y darles un valor:** Esta etapa supone encontrar información para mostrar si los *outcomes* han sucedido y luego valorarlos.
4. **Establecer el impacto:** Habiendo recogido información sobre los *outcomes*, y habiéndolos monetizado, esos aspectos de cambio que habrían sucedido de todos modos o que son consecuencia de otros factores se dejan fuera de consideración.
5. **Calcular el SROI:** Esta etapa supone añadir todos los beneficios, sustrayendo lo negativo y comparando el resultado con la inversión.
6. **Reportar, usar y certificar:** Este último paso fundamental supone compartir conclusiones con los *stakeholders* y responder a ellos, incorporar buenos procesos para los *outcomes* y verificar el reporte.

Primero, se establecen los alcances del análisis. Considerando el objetivo de este proyecto se pueden inferir como alcances de este proyecto:

- Determinar el beneficio proporcionado de la implementación y operación de una micro central hidroeléctrica a partir de un sistema de cosecha de lluvia en una construcción de tipo industrial
- Estimar el impacto ecológico de generar energía eléctrica mediante un sistema de cosecha de lluvia en zonas urbanas

Posteriormente, se identifican a los grupos de interés o *stakeholders* que son definidos como personas u organizaciones que experimentan un cambio o afectan la actividad, tanto de forma positiva o negativa, del proyecto (Watson *et al.*, 2016). La tabla 4.5 muestra la selección de *stakeholders* identificados.

Tabla 4.5. Selección de *stakeholders* en el proyecto

<i>Stakeholders</i> clave	Razón para su inclusión
Medio ambiente	Agente que , se espera, reciba un beneficio al generar energía eléctrica de manera renovable y al reducir la emisión de dióxido de carbono en la atmosfera.
Sector industrial	Proporcionará los recursos para la implementación del sistema. Además de reducir su consumo eléctrico durante la operación del sistema.
<i>Stakeholders</i> excluidos	Razón para su exclusión
Población del valle de Toluca	Sector no involucrado de manera directa en el proyecto.

Una vez instalado el sistema, se evalúan los beneficios generados en función de la cantidad de energía producida \dot{W}_{gen} y el beneficio que se le puede obtener de esta. Por ejemplo, una de las pretensiones del proyecto es que el sistema sea capaz de abastecer el alumbrado en el estacionamiento de la planta, el cual consiste en 4 lámparas tipo LED con un consumo de 100 W cada una. Adicionalmente, se evalúa el impacto ecológico que se produce ya que la micro central no genera ningún tipo de residuo nocivo para el medio ambiente durante su operación. Para ello, se estima el equivalente de emisión de CO_2 que se evitaría con la operación de la micro central considerando que 1 kWh de energía producida equivale a 0.94 kg de CO_2 (Bhargav *et al.*, 2016).

Adicionalmente, es importante ubicar los alcances del proyecto respecto a lo que concierne al proceso de diseño. La NASA (2019) menciona que el proceso de diseño está compuesto por 8 pasos:

1. **Identificar el problema**
2. **Identificar variables y restricciones de diseño**

3. **Lluvia de ideas de posibles soluciones**
4. **Seleccionar el diseño**
5. **Construir el modelo o prototipo**
6. **Evaluar y someter a pruebas el modelo**
7. **Refinar el diseño**
8. **Compartir la solución**

Considerando lo realizado en este proyecto de investigación, se puede decir que el sistema cubre hasta el paso número 6 (Evaluar y someter a pruebas el modelo). Por lo que es necesario un refinamiento del modelo para su posterior divulgación y difusión como un producto en el mercado.

CAPITULO 5. ZONA DE ESTUDIO

El caso de estudio considerado para el presente trabajo está ubicado dentro de la zona metropolitana del Valle de Toluca, Estado de México que abarca una extensión territorial de aproximadamente 1 035. 8 km² y abarca 15 municipios (Toluca, Metepec, Lerma, Calimaya, Temoaya y Zinacantepec, entre otros;). En el contexto fisiográfico, la región está asociada con la cuenca del Curso Alto del Río Lerma (CARL) y presenta tres tipos de clima: templado (el más predominante en el valle), semifrío y frío (en zonas altas) (INECC, 2012). El volumen de lluvia total en la zona se estima en 2013 hm^3 para un año medio con una lámina promedio de precipitación de 965 mm (Fonseca, 2014). El periodo con mayor precipitación abarca del mes de mayo a octubre, como se muestra en la distribución de la precipitación para un año medio (Figura 5.1).

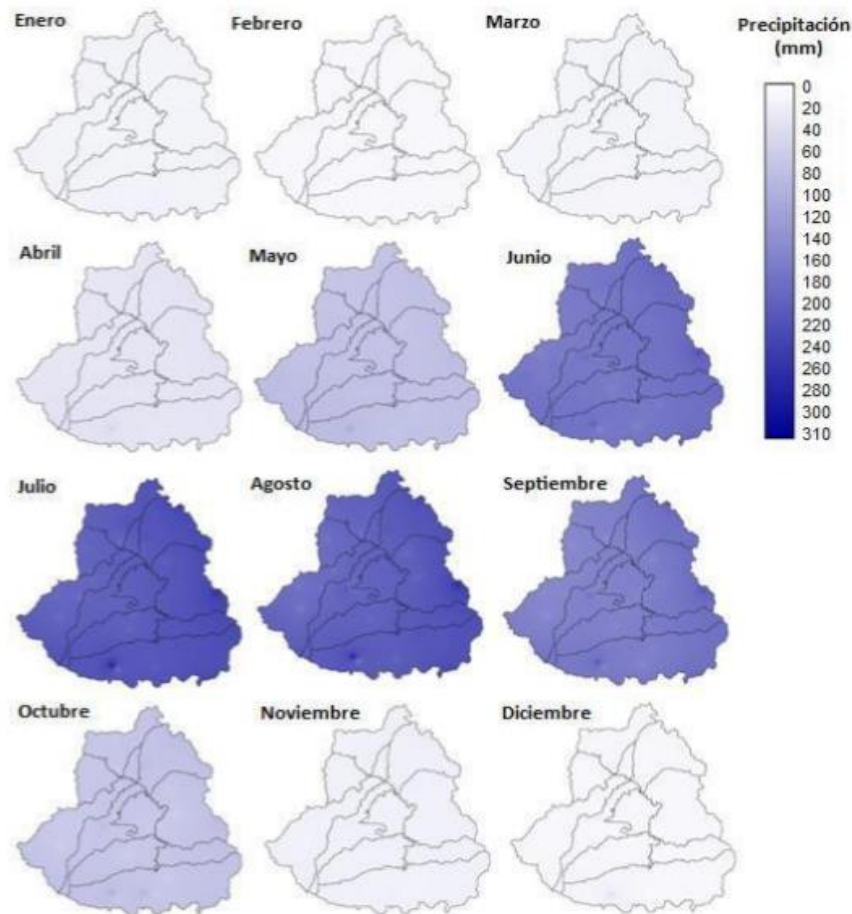


Figura 5.1. Distribución temporal y espacial de la precipitación media en el CARL (Fonseca, 2014)

La instalación de la micro central hidroeléctrica operando a partir de cosecha de lluvia se llevará a cabo en la planta de producción Dana de México Corporación S. de R.L. de C.V. (2019) ubicada en el Parque industrial Lerma, Toluca, México (Figura 5.2). La planta cuenta con un área de captación total de

15 485.68 m^2 con un total de 16 bajadas que desahogan el agua captada en el techo hacia el suelo. Por ello, a cada bajada le corresponde un área tributaria de 1 303.33 m^2 .

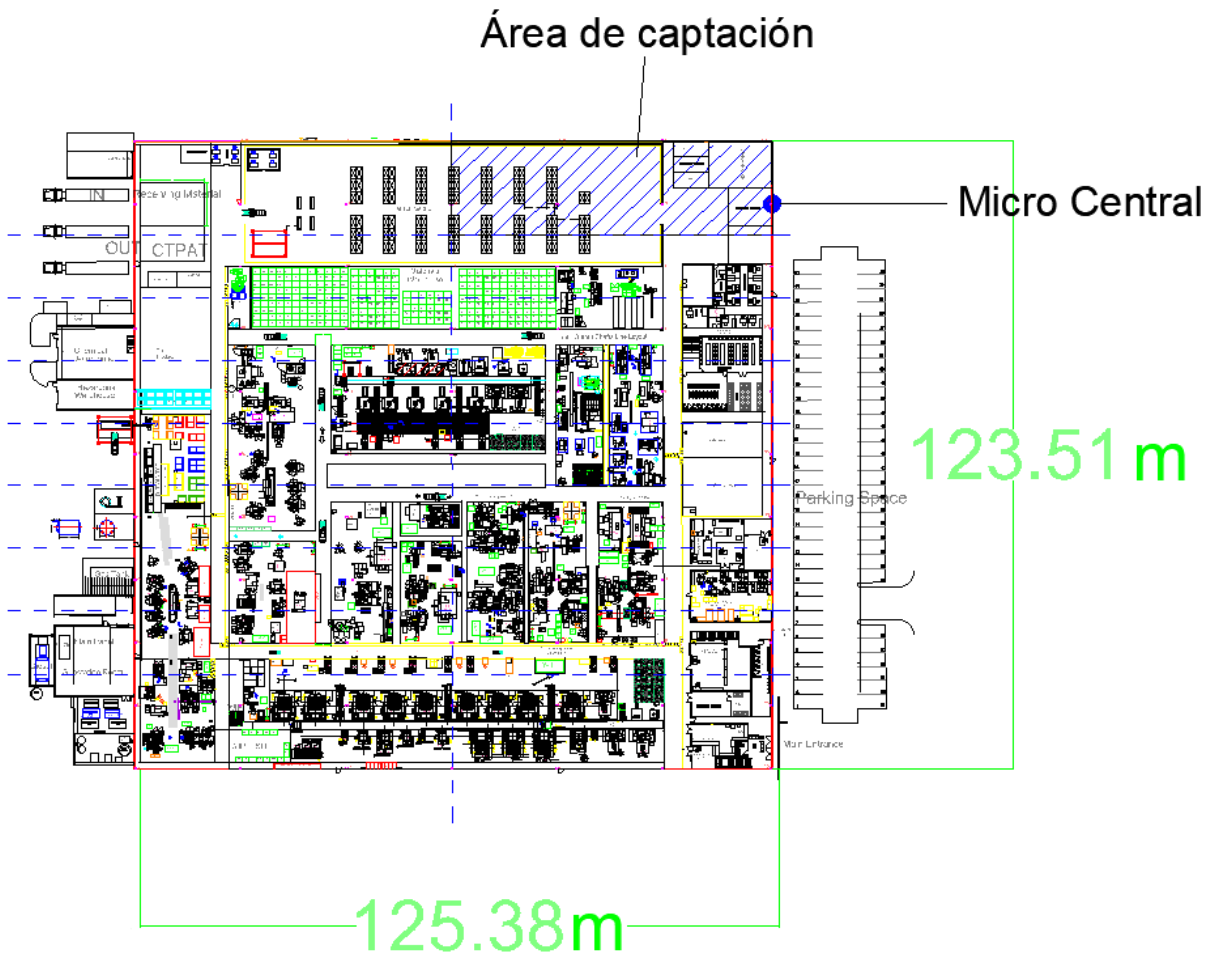


Figura 5.2. Croquis de la planta industrial Dana de México para la instalación de una micro central hidroeléctrica

CAPITULO 6. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto de acuerdo con la metodología descrita en el capítulo 4. Los resultados describen las características físicas, geométricas y operativas de una micro central hidroeléctrica que opera a partir de un sistema de cosecha de lluvia.

6.1. Descripción y selección de turbinas

La primera etapa del proyecto consistió en la descripción y selección del tipo de turbina del sistema hidroeléctrico. Dicha selección se realizó en función de los diferentes tipos de turbinas existentes, las características, el régimen de operación de cada una de ellas y las condiciones de infraestructura y de operación disponibles en el sitio donde se pretende implementar el sistema (carga hidráulica y caudal).

La identificación y definición de los tipos de turbinas fue un factor esencial en la decisión de qué tipo de turbina utilizar. El presente proyecto considera una turbina de tipo Pelton como elemento principal de la micro central hidroeléctrica. La selección por este tipo de turbina se debe a su capacidad de trabajar con cargas hidráulicas altas y valores de caudal bajo (Fox & McDonald, 2002).

El criterio de selección se basó en maximizar el volumen de agua captado mediante el sistema de cosecha de lluvia y aprovechar la carga hidráulica proporcionada por el inmueble donde se pretende instalar. Considerando estos factores, la turbina tipo Pelton es la más adecuada para este sistema en comparación con turbinas como las tipo Francis o Kaplan que requieren mayores volúmenes de agua y valores bajos de carga hidráulica para operar (Mataix, 2008). La turbina de tipo Pelton basa su operación en la energía potencial proporcionada por la carga hidráulica y siendo menos susceptible por variaciones en el caudal de entrada y del torque (Potter, 2002).

6.2. Definición del sistema de almacenamiento de energía eléctrica

Esta etapa consistió en la selección del generador eléctrico y el sistema de almacenamiento de energía del sistema. La estructura y características de este sistema permitieron establecer restricciones y parámetros de diseño de la micro central hidroeléctrica.

El primer elemento del sistema eléctrico es el generador eléctrico que establece las condiciones mínimas de operación. El torque mínimo del generador se determinó en $1.146 \text{ N} \cdot \text{m}$, de acuerdo con estimaciones analíticas realizadas con regímenes de operación proporcionados por proveedor (Missouri Wind and Solar, 2018). Es importante mencionar que, a mayor valor de revoluciones por minuto alcanzadas por el sistema, mayor es la producción de voltaje y de corriente eléctrica. La Tabla 6.1 muestra los valores de producción de voltaje y corriente eléctrica del generador, obtenidos mediante pruebas controladas

operando con diferentes valores de revoluciones por minuto. La Figura 6.1 muestra la tendencia de la generación de voltaje eléctrico donde la tendencia prácticamente es de carácter lineal. Mientras que, la producción de corriente eléctrica (Figura 6.2) muestra una tendencia no lineal, inicialmente, a comparación del voltaje eléctrico cuyo comportamiento es proporcional conforme aumenta el valor de revoluciones por minutos.

Tabla 6.1. Valores de producción de voltaje y corriente eléctrica del generador

Número de RPM's	Voltaje [V]	Corriente [A]
64	3.40	0.01
130	7.35	0.01
210	12.15	0.01
380	22.35	4.50
460	26.65	6.40
790	46.70	16.50
940	55.70	ND
1300	76.60	ND

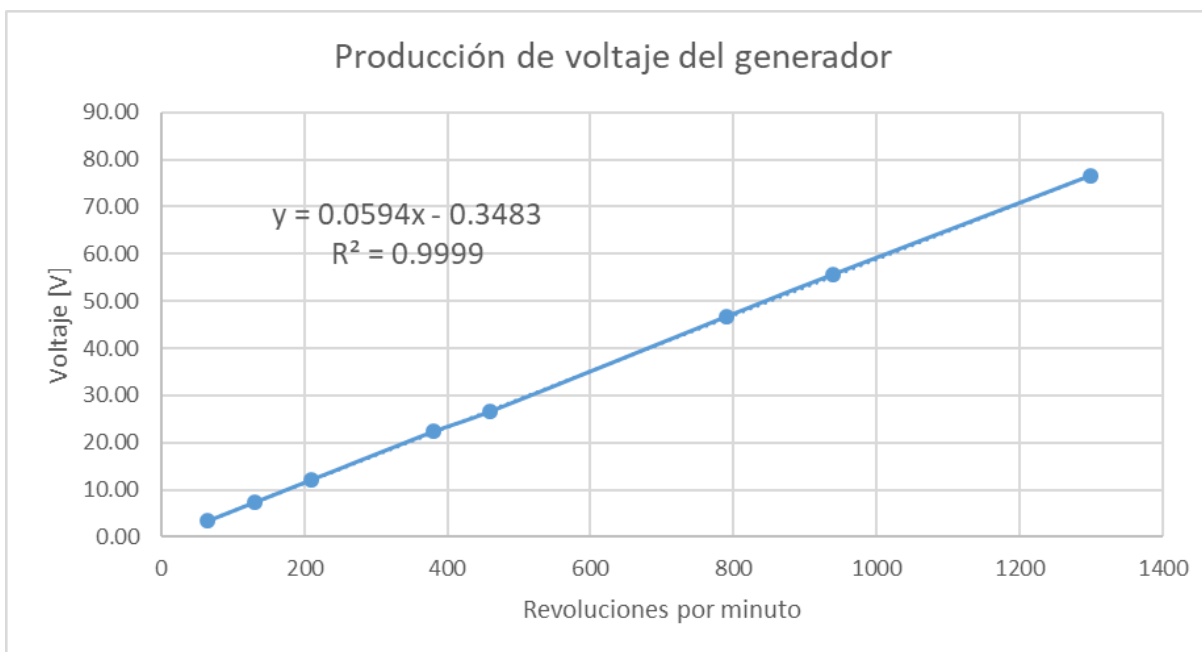


Figura 6.1. Comportamiento del voltaje en el generador en función del número de revoluciones por minuto

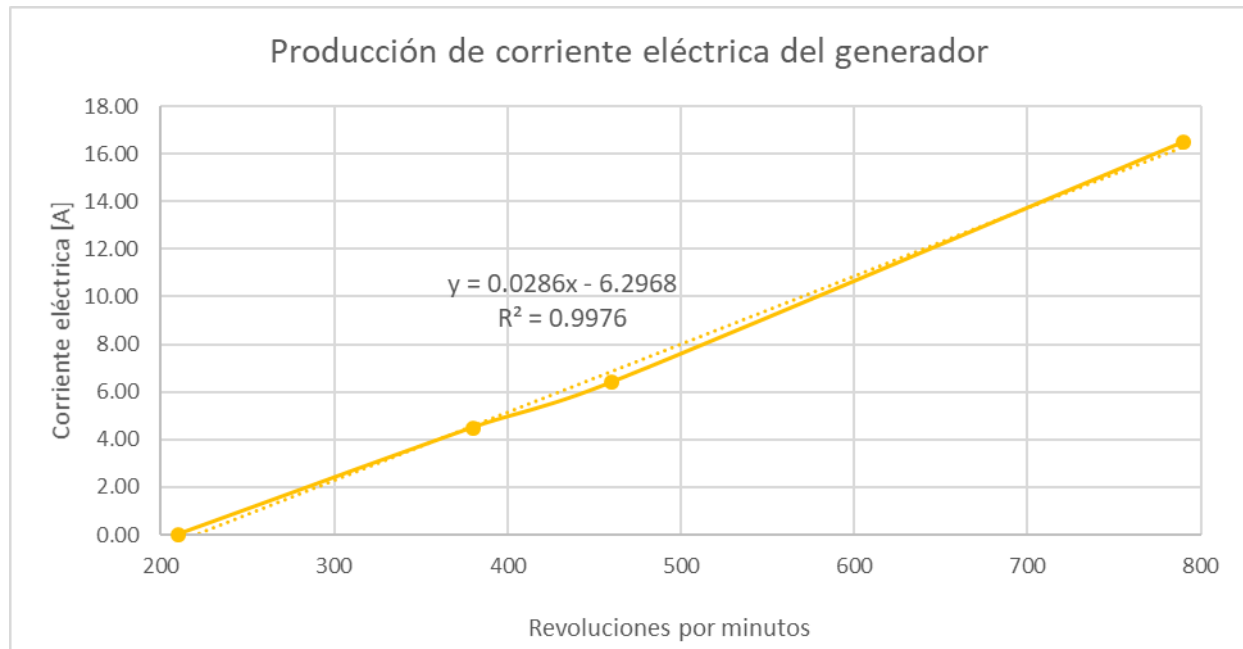


Figura 6.2. Tendencia de producción de corriente eléctrica en el generador según el número de revoluciones por minuto

El sistema de almacenamiento de energía está compuesto por dos baterías de ciclo profundo y libres de mantenimiento utilizadas normalmente para sistemas fotovoltaicos con un voltaje de 12 V y una capacidad de almacenamiento de 22 Ah (Teknosolar, 2019). La conexión del generador a las baterías se realizó en paralelo para mantener el voltaje constante a la salida del generador y un controlador para regular el voltaje y la corriente eléctrica entrantes a las baterías.

6.3. Configuración hidráulica

La definición de la configuración de la bajada del sistema de cosecha de lluvia se realizó mediante un proceso de evaluación de factibilidad sobre distintos parámetros geométricos e hidráulicos. A partir del análisis estadístico, se consideró la lámina de precipitación estimada P_i obtenida del Sistema Gestor de Desarrollo (IITCA-UAEMex; SiGeDes, 2018), una superficie de captación de 1 303.33 m² (correspondiente a las dimensiones de la nave industrial) y un coeficiente de escurrimiento, de acuerdo con SEMARNAT (2016), de 0.8; para estimar el volumen de agua esperado por día en la zona de estudio (Tabla 6.2).

A partir de los valores de volúmenes esperados por día, se estimó el caudal esperado Q_{esp} considerando las pérdidas locales y por fricción según la configuración propuesta para el sistema de conducción en el proceso de cosecha de lluvia (Tabla 6.3).

Tabla 6.2. Láminas de precipitación diaria esperadas para el caso de estudio

Mes	Desviación estándar	Lámina mínima [mm]	Lámina media [mm]	Lámina máxima [mm]
Mayo	2.93	0.0	2.06	4.52
Junio	5.13	0.83	5.15	9.46
Julio	4.20	2.17	5.71	9.24
Agosto	4.34	1.97	5.62	9.27
Septiembre	4.74	1.03	5.02	9.01
Octubre	3.24	0.0	2.17	4.89

SiGeDes (2018)

Tabla 6.3. Proceso de determinación de la configuración hidráulica del sistema

Alternativa	Altura boquillas [m]		Caudal de diseño $\left[\frac{l}{s}\right]$	Potencia mínima esperada [W]	Pérdidas por fricción [m]	Limitaciones	Insumos adicionales
	Boquilla 1	Boquilla 2					
1	3	-	2.069	60.891	0.302	Tiempo de descarga largo	Bajada adicional
2	3	6	2.069	60.891	0.302	Transmisión poco factible	Engranajes y ejes adicionales
3	4.5	4.5	4.86	176.45	0.822	Menor tiempo de operación	Conexiones adicionales

La alternativa 1 (Figura 6.3a) consideró únicamente operar con una boquilla con una carga hidráulica H_T de 3 m y una potencia mínima esperada de 60.89 W. El tiempo de descarga lo declaraba poco factible al no ser capaz de igualar el caudal de entrada en el sistema de cosecha de lluvia con el caudal suministrado a la turbina. Por lo cual, se determinó que era necesario adicionar una boquilla más para evitar un caso de desbordamiento en el sistema de cosecha de lluvia.

La alternativa 2 (Figura 6.3b) consideró adicionar una segunda boquilla, con respecto a la primera, a una altura de 6 m para evitar el riesgo de desborde con eventos de precipitación intensos e iniciando a operar

alcanzando dicha altura en la columna de agua. A pesar de esta medida, la necesidad de implementar engranes y ejes adicionales y de sistemas electromecánicos para aprovechar adecuadamente la energía potencial del agua y controlar estos elementos volvieron poco factible esta configuración.

Finalmente, en la alternativa 3 (Figura 6.3c) se propuso la instalación de dos boquillas a una misma carga hidráulica de operación ($H_T = 4.5 \text{ m}$). Con ello se reduce el tiempo de descarga en el sistema, pero se ve compensado por la cantidad de potencia esperada (176.45 W) en el chorro de agua a la entrada de la turbina. Además de proporcionar mayor estabilidad en la turbina respecto a la relación energía aprovechada y la carga hidráulica, considerando que las dos boquillas son capaces de desahogar el agua concentrada en el sistema de conducción.

Considerando las limitaciones, el caudal de descarga, la potencia mínima esperada e insumos requeridos se determinó utilizar las características propuestas de la alternativa 3. Los valores de las variables de la bajada son el diámetro de bajada $\varnothing_{bajada} = 6 \text{ in}$, 2 boquillas de suministro a la turbina, el diámetro de chorro $d_{jet} = 0.75 \text{ in}$ y la carga hidráulica mínima $H_T = 4.5 \text{ m}$. La configuración de la alternativa 3 fue elegida debido a no requiere de la adición de elementos de carácter mecánicos y/o electromecánicos. Además, el valor del caudal de diseño permite que el tiempo de descarga sea menor y se eviten desbordamientos en la instalación.

La boquilla utilizada en la bajada se encuentra ilustrada en la Figura 6.4. Donde, la caracterización geométrica se llevó a cabo según el perfil propuesto por Nechleba (1957; Figura 4.7). Los valores de los coeficientes se establecieron como el valor medio de los umbrales propuestos por el autor. En este punto, no se realizó una evaluación de la inferencia de variar dichos parámetros geométricos para optimizar la geometría de la boquilla. Por lo cual, se sugiere realizar un estudio más detallado para la optimización de este elemento.

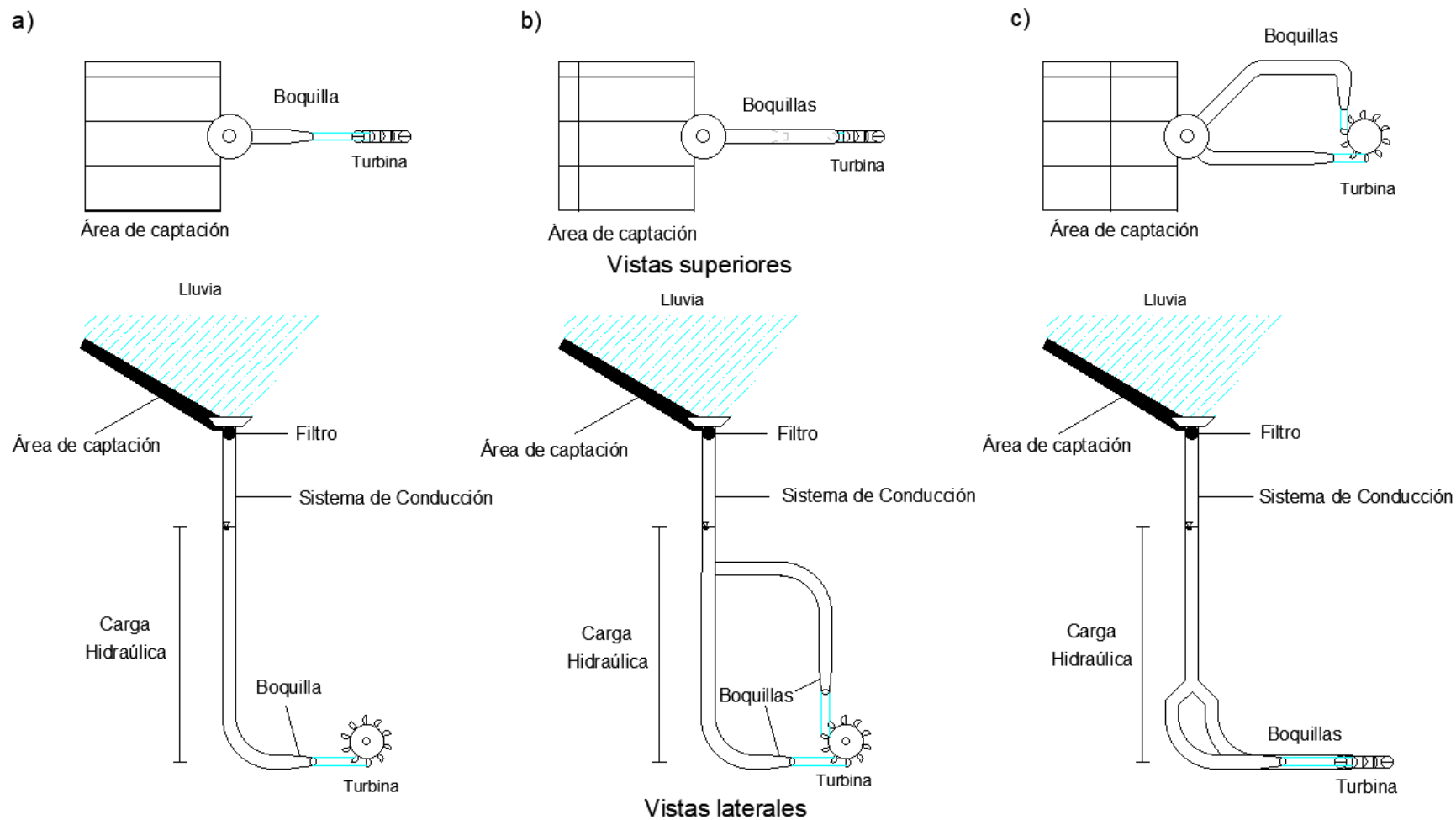


Figura 6.3. Alternativas propuestas de boquillas y turbina.

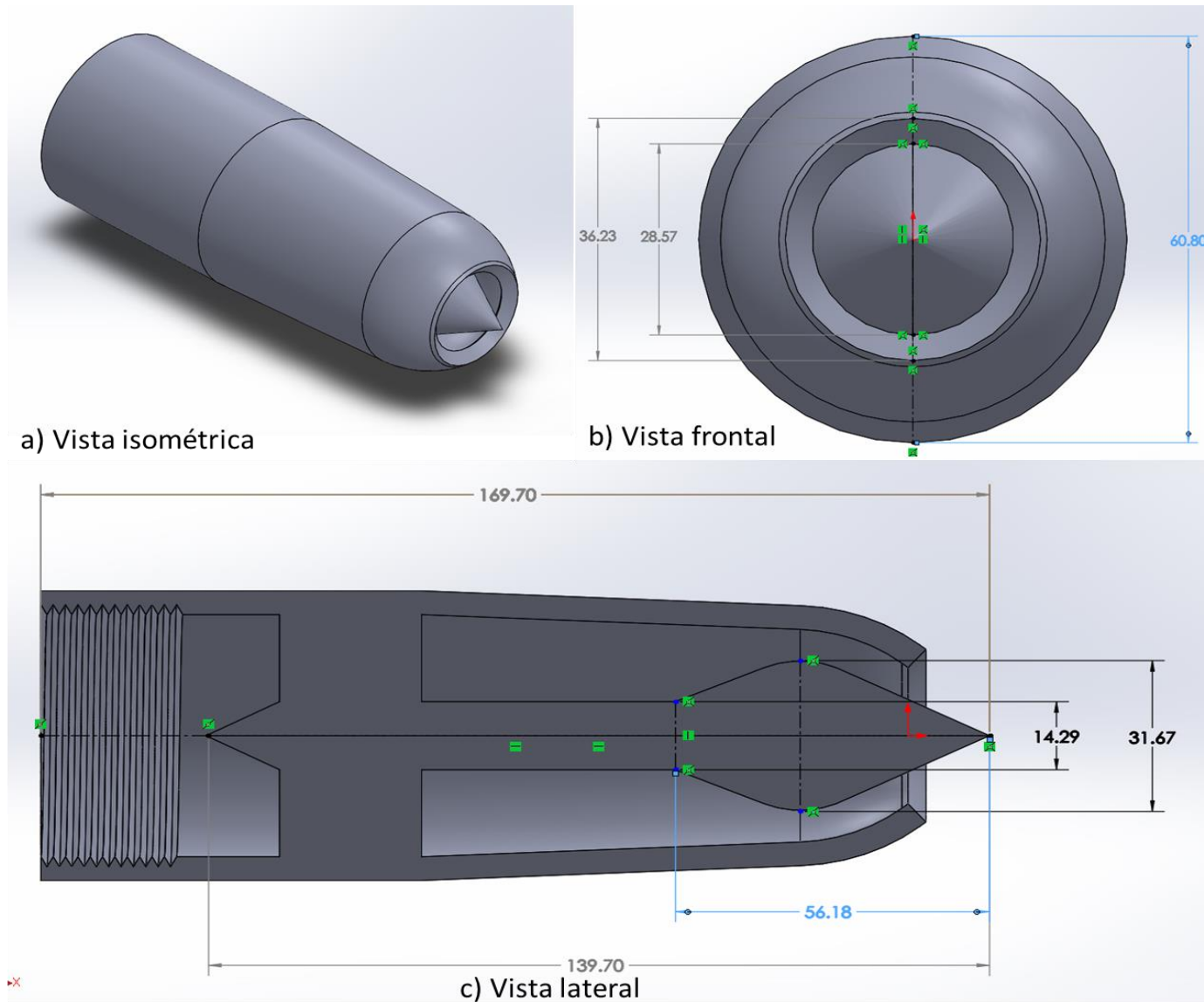


Figura 6.4. Vistas de la boquilla: a) Isométrica, b) Frontal, c) Lateral.

Parte de esta etapa consistió en analizar mediante CFD el comportamiento del flujo bajo las condiciones de operación esperadas, principalmente bajo diferentes valores de carga hidráulica y del caudal que transita por parte de la bajada hasta la salida de la boquilla. Mediante un software de tipo CAD, se modeló la geometría del fluido a través de una sección de la bajada hasta la salida del chorro en la boquilla (Figura 6.5). Para la simulación, inicialmente, se definen las entradas y salidas del sistema para el análisis numérico por continuidad (ecuación 3.2). Posteriormente, se generó la malla del dominio empleando una topología estructurada mediante poliedros con un tamaño máximo de elemento de 10 *mm* y alcanzando un índice de calidad de elementos de 0.8403. Se le aplicó especial atención a la zona de la boquilla y la salida del chorro para generar un refinamiento (el tamaño de elemento fue de 2 *mm* en esta región del dominio) con tal de asegurar una discretización de buena calidad que permita una simulación fiable (227 348 nodos y 1 187 658 elementos en todo el dominio del fluido; Figura 6.6) y conocer el comportamiento del fluido en esta zona de la bajada.

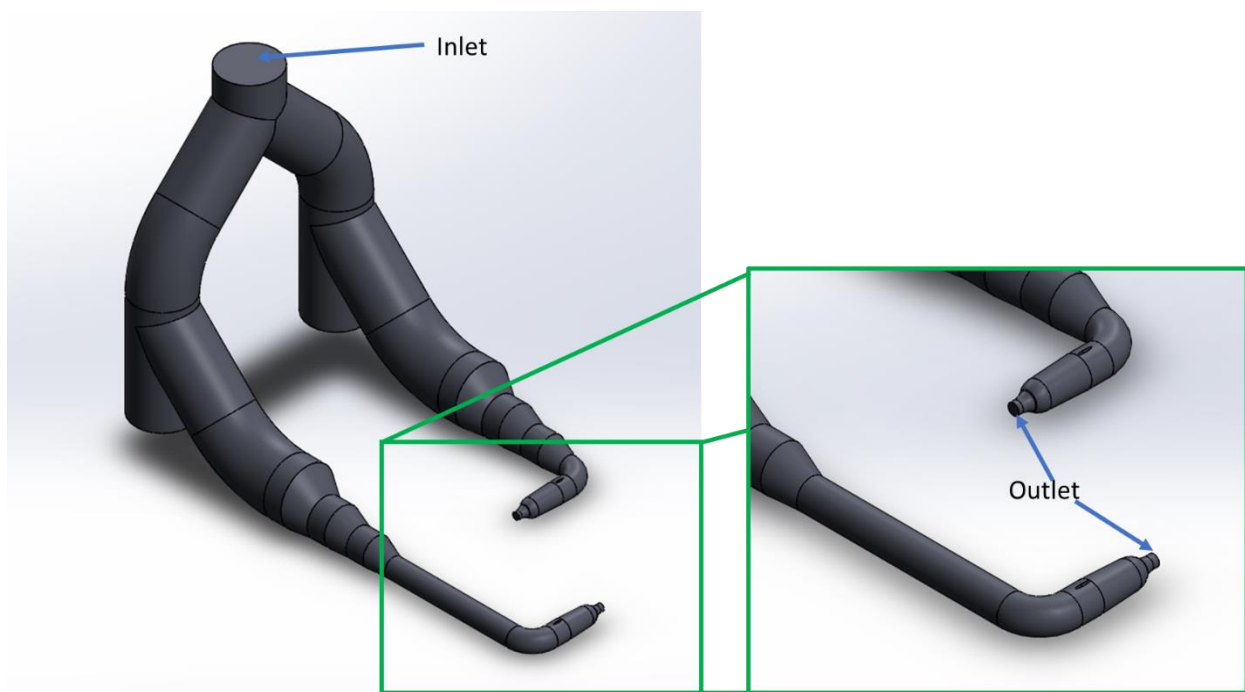


Figura 6.5. Dominio de la bajada del sistema de cosecha de lluvia.

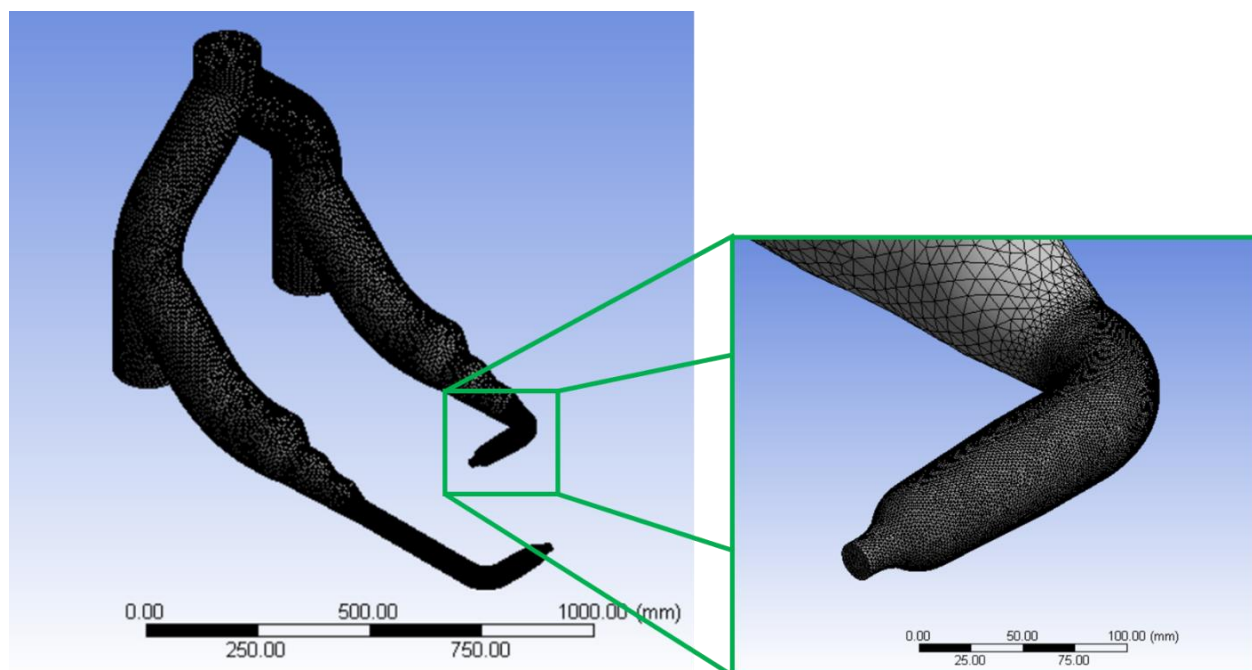


Figura 6.6. Malla utilizada para la simulación de la bajada del sistema de cosecha de lluvia.

Se definieron las condiciones de operación para los escenarios de precipitación esperados. Los escenarios propuestos: mínimo ($H_T = 4.5 \text{ m}$), medio ($H_T = 6 \text{ m}$) y máximo ($H_T = 10 \text{ m}$); se obtuvieron a partir de los valores de lámina de precipitación esperados para la temporada de lluvias (Tabla 6.2) y la ecuación de la energía para una vena líquida (ecuación 4.4) considerando las pérdidas generadas por los cambios de dirección, reducción de área, etc. (Tabla 6.5). De acuerdo con los datos estimados analíticamente mediante la ecuación de la energía para una vena líquida (ecuación 4.4) y cuyos valores de caudal y velocidad de chorro esperados se muestra en la Tabla 6.6.

Tabla 6.5. Factores de pérdidas de energía en la bajada del sistema

Número	Tipo de pérdida	Valor del cambio	Factor de pérdida k
1	Bifurcación	45°	0.7
2	Cambio de dirección 6 in	45°	0.25
3	Reducción de área	6 – 4 in	0.305
4	Reducción de área	4 – 2 in	0.30
5	Reducción de área	2 – 0.75 in	0.19

Tabla 6.6. Estimación analítica de caudal esperado a la salida de la bajada del sistema de cosecha de lluvia.

Carga hidráulica [m]	Diámetro del chorro [in]	Estimación analítica	
		Caudal por boquilla [$\frac{l}{s}$]	Velocidad del chorro [$\frac{m}{s}$]
4.5	0.75	2.430	8.526
6	0.75	2.813	9.869
10	0.75	3.629	12.801

Los resultados del análisis numérico en la bajada de lluvia se pueden apreciar en las Figuras 6.7 y 6.8 (escenarios mínimo y medio, respectivamente). En términos generales, se puede observar que, para los dos escenarios modelados, el flujo se comporta de manera estable en casi todo el dominio del fluido y sin cambios significativos respecto a pérdidas o turbulencia a través del sistema de conducción para los escenarios propuestos. Sin embargo, la presencia de pequeños vórtices (rotación de un fluido) en la base de la tubería que indican, como en todo sistema, que la bajada presenta pequeñas pérdidas de energía por fricción en las paredes de la tubería.

La región correspondiente a la boquilla muestra cambios significativos en el flujo (velocidad y presión principalmente). Los cambios se deben en gran medida a la presencia de la aguja en el interior de la boquilla que produce un incremento en la velocidad de salida del chorro (Figura 6.9) y un descenso en la presión del fluido (Figura 6.10). Se deduce que la geometría de la boquilla, especialmente la aguja, tiene una inferencia significativa como dispositivo en la conversión de energía potencial, proporcionada por la carga hidráulica, en energía cinética (velocidad del chorro).

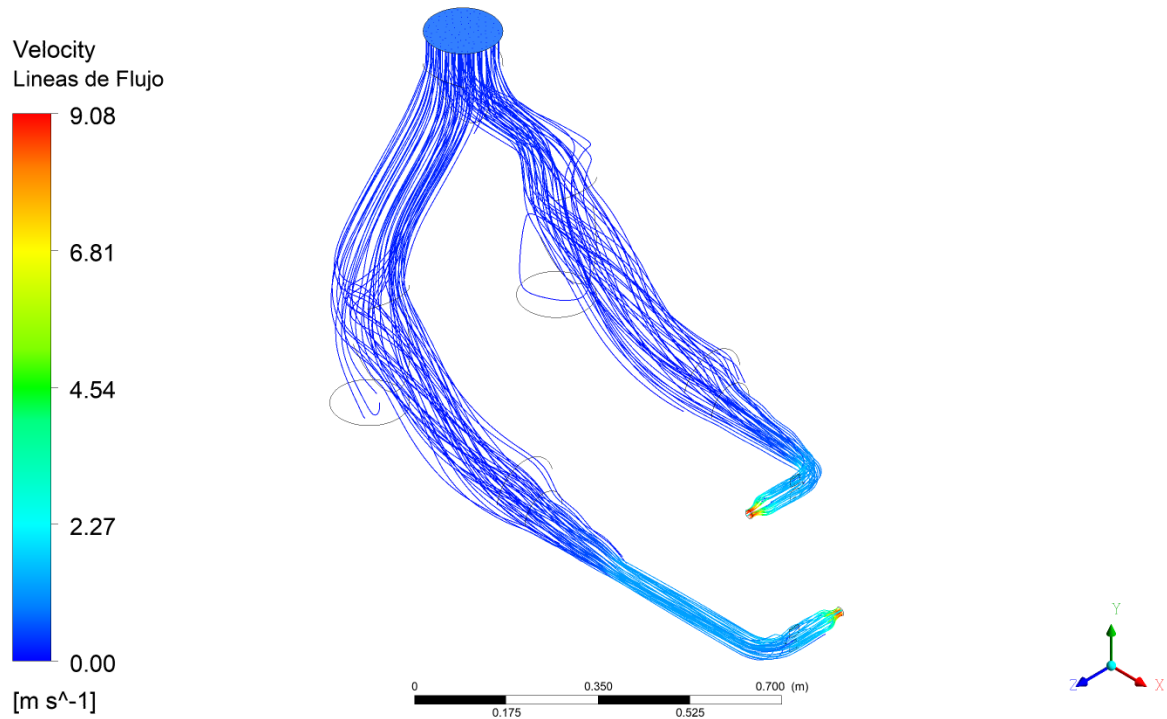


Figura 6.7. Visualización del flujo a través de la bajada para el escenario mínimo de operación $H_T = 4.5 \text{ m}$.

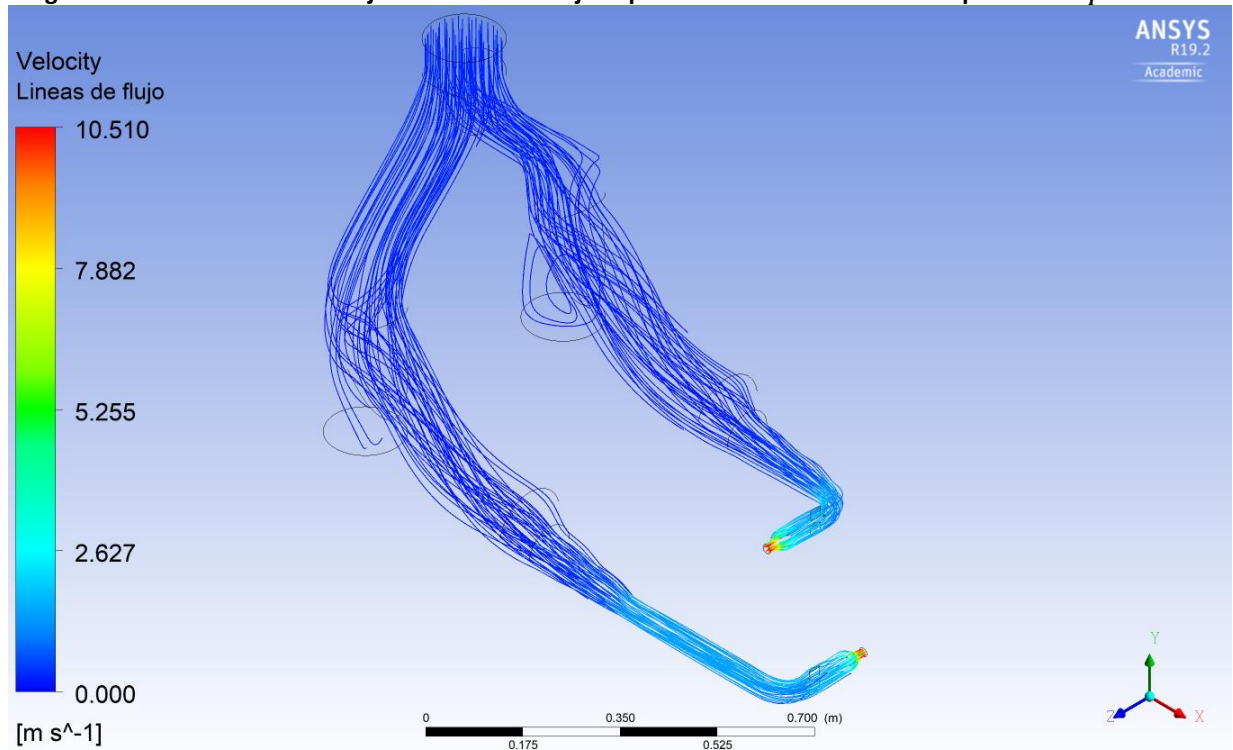


Figura 6.8. Visualización del flujo a través de la bajada para el escenario medio de operación $H_T = 6 \text{ m}$.

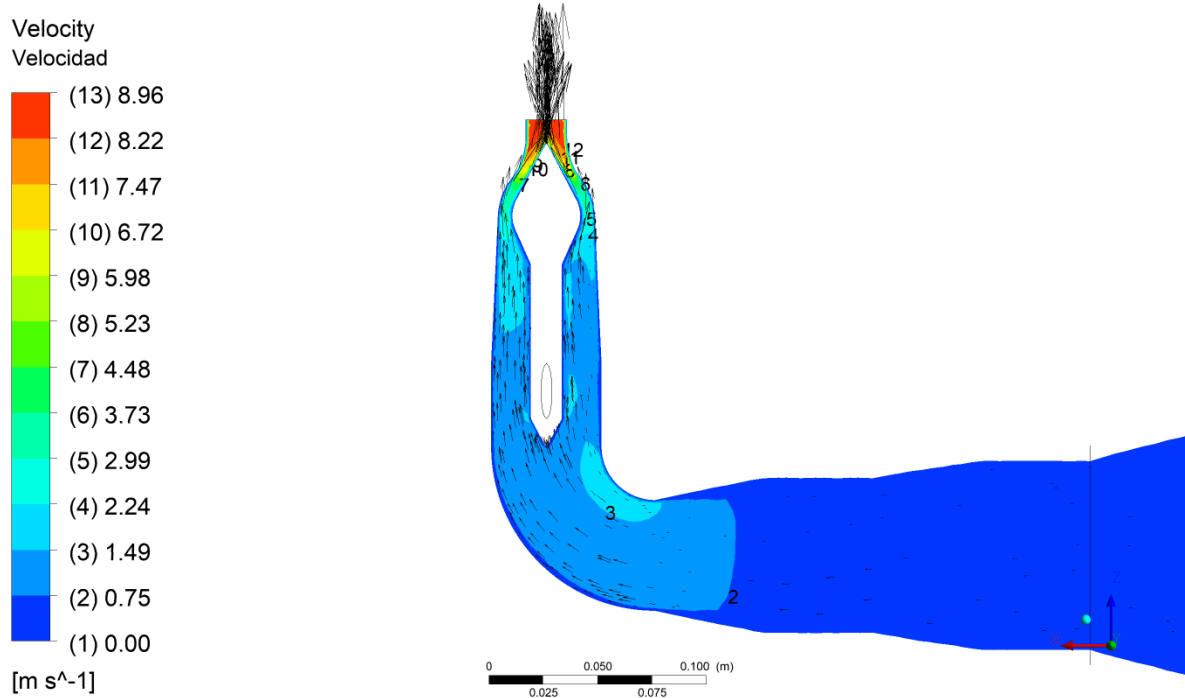


Figura 6.9. Campo de velocidad total en el flujo a través de la boquilla para el escenario mínimo de operación $H_T = 4.5 \text{ m}$

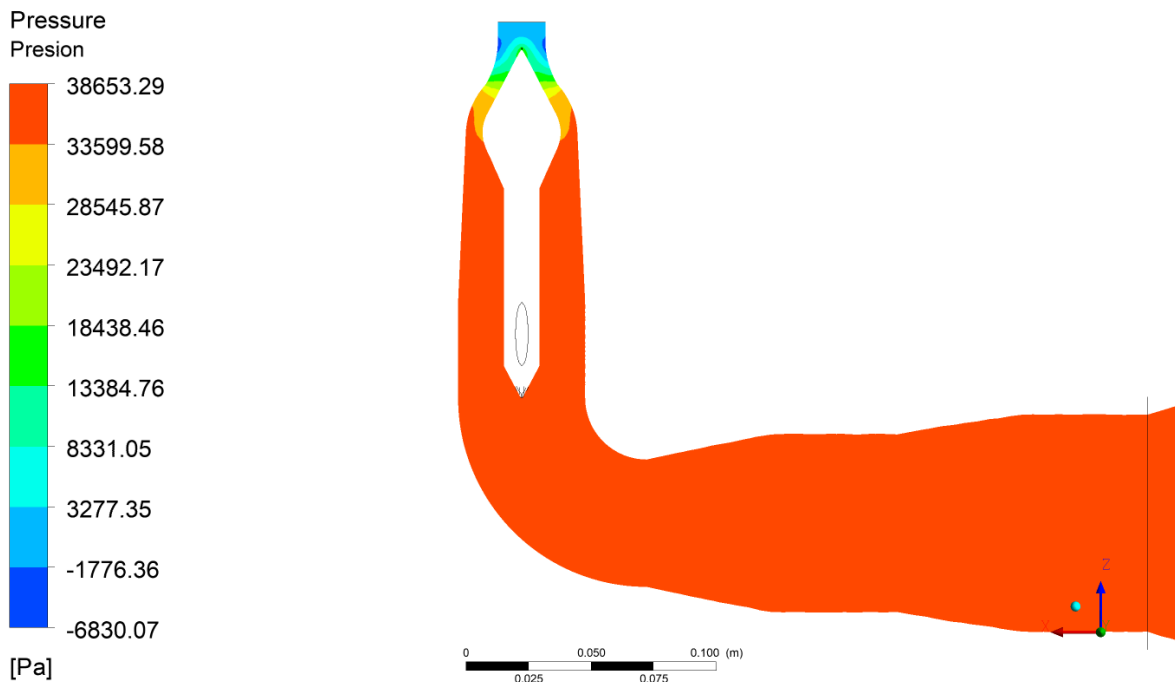


Figura 6.10. Campo de presión en el flujo a través de la boquilla para el escenario mínimo de operación $H_T = 4.5 \text{ m}$.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación de la bajada, se realizó una comparación de resultados entre los caudales estimados mediante la ecuación de la energía y los datos proporcionados por el software (Tabla 6.7). Se puede apreciar un error relativo no mayor a 1.5% para los tres escenarios de operación (tanto caudal como velocidad). Por ello, se puede inferir que el comportamiento estimado analíticamente es validado por los resultados obtenidos por el software y es fiable emplear los datos para la caracterización geométrica de la turbina y otros elementos.

Tabla 6.7. Comparación de resultados en el sistema de conducción de la bajada.

Carga hidráulica (m)	Diámetro del chorro (in)	Estimación analítica		Estimación CFD		Error relativo	
		Caudal $\left[\frac{l}{s}\right]$	Velocidad del chorro $\left[\frac{m}{s}\right]$	Caudal $\left[\frac{l}{s}\right]$	Velocidad del chorro $\left[\frac{m}{s}\right]$	Caudal [%]	Velocidad [%]
4.5	0.75	2.430	8.526	2.462	8.640	1.33	1.34
6	0.75	2.813	9.869	2.853	10.01	1.42	1.43
10	0.75	3.629	12.801	3.657	12.902	0.77	0.77

A partir de los valores de caudal obtenidos en la Tabla 6.6, se estimó el tiempo de descarga $t_{descarga}$ mediante la ecuación 4.5 y 4.6 (Tabla 6.8). Según la configuración definida para la bajada del sistema de cosecha de lluvia (alternativa 3), se espera una producción mínima de energía igual con 0.8035 kWh/mes , correspondiente al mes de Mayo, y un valor máximo de 2.2245 kWh/mes , correspondiente al mes de Julio. El valor de energía esperada se limita a la implementación de una micro central hidroeléctrica bajo condiciones medias de precipitación. Los valores de energía pueden variar de acuerdo con el valor de la lámina de precipitación en la zona, la intensidad de eventos y el número de micro centrales hidroeléctricas instaladas.

Tabla 6.8. Tiempos de descarga y energía media esperados en el sistema

Mes	Tiempo de descarga			Energía media esperada $\left[\frac{kWh}{mes}\right]$
	Condiciones mínimas $[min]$	Condiciones medias $[min]$	Condiciones máximas $[min]$	
Mayo	NA	7.05	13.38	0.8035
Junio	2.83	17.59	27.97	1.9411
Julio	7.43	19.51	27.32	2.2245
Agosto	6.72	19.20	27.40	2.1898
Septiembre	3.52	17.17	26.65	1.8944
Octubre	NA	7.40	14.46	0.8441

6.4. Propuesta del árbol de experimentos para análisis de sensibilidad mediante CFD y determinación de indicadores de rendimiento

La primera parte de esta etapa corresponde a la caracterización geométrica de la turbina. En primer lugar, el radio de la turbina $r_{turbina} = 0.2002 \text{ m}$ se obtuvo mediante la ecuación 4.7. Donde los valores de las variables son el torque mínimo impuesto por el generador $T = 2.292 \text{ N} \cdot \text{m}$, la velocidad de operación de la turbina $\omega = 350 \text{ rpm} = 36.65 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, un caudal de diseño $Q_{sum} = 4.86 \text{ l/s}$, una velocidad de entrada del chorro de $\vec{V}_{jet} = 8.526 \text{ m/s}$ y el ángulo de salida del flujo en la cazoleta $\beta_2 = 165^\circ$. Por otro lado, la caracterización geométrica de la cazoleta se realizó de acuerdo con perfiles propuestos por diversos autores en función del diámetro del chorro d_{jet} (Figura 6.11).

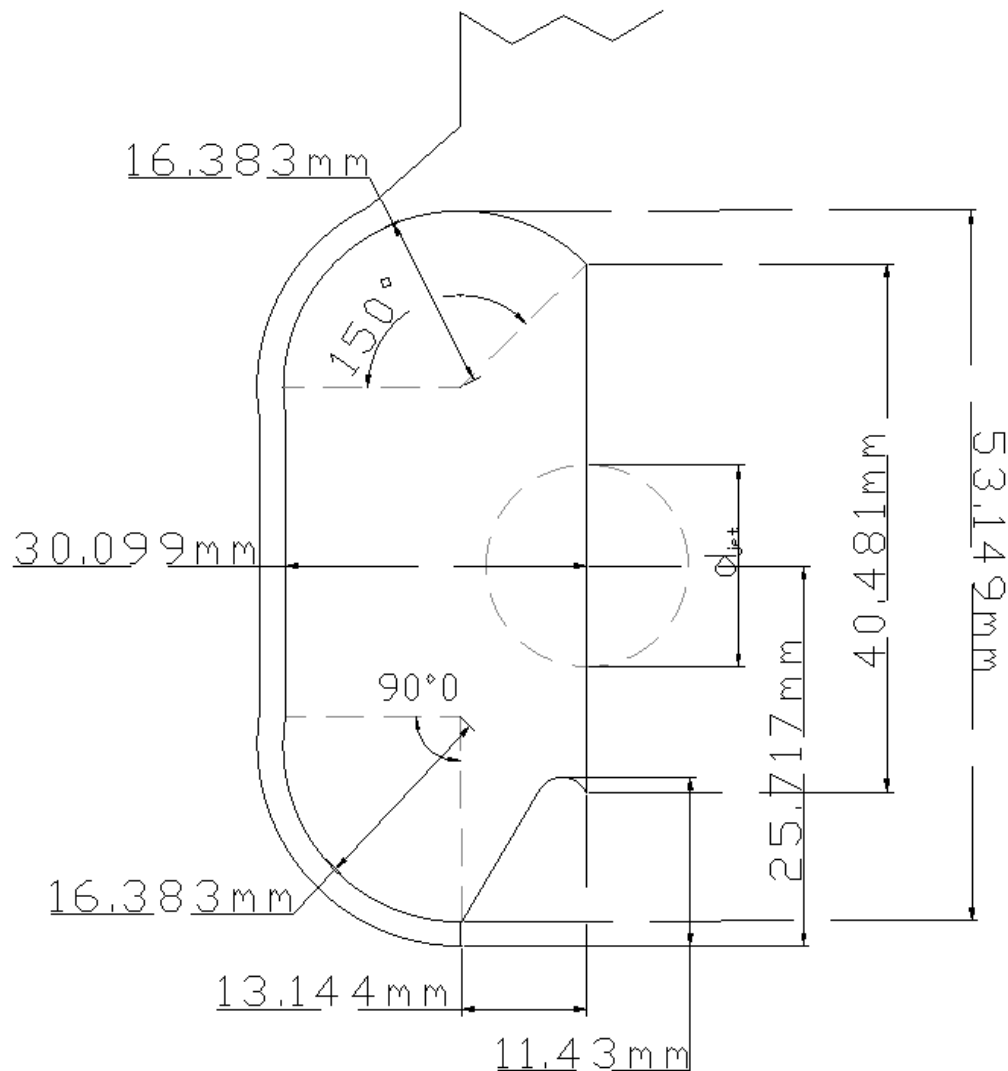


Figura 6.11. Caracterización geométrica base cazoleta de una turbina tipo Pelton (Nechleba, 1957, Rai *et al.*, 2016, Atthanayake, 2009)

Definidas las condiciones geométricas de la turbina, fue construido el árbol de experimentos, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la metodología (Tabla 4.2), donde cada característica geométrica está definida por umbrales de variación geométrica para evaluar el impacto en la eficiencia para cada configuración propuesta. La evaluación se planteó bajo los tres escenarios de operación propuestos: mínimo ($H_T = 4.5 \text{ m}$, $Q_{sum} = 4.86 \frac{\text{l}}{\text{s}}$), medio ($H_T = 6.0 \text{ m}$, $Q_{sum} = 5.70 \frac{\text{l}}{\text{s}}$) y máximo ($H_T = 10.0 \text{ m}$, $Q_{sum} = 7.31 \frac{\text{l}}{\text{s}}$); donde el parámetro que presenta mayor variación es el valor de caudal suministrado por las boquillas, y, por ende, la velocidad del chorro de agua V_{jet} a la salida de la boquilla.

La confección del árbol de experimentos (Figura 6.12) se dividió en dos partes. La primera parte, contempla la variación de los primeros dos parámetros (Longitud $L_{bucket} [\text{mm}]$ y altura de la cazoleta $A_{bucket} [\text{mm}]$). El objetivo de la división en la evaluación es optimizar por partes la estructura de la turbina. Es decir, la longitud y la altura de la cazoleta son parámetros que permiten evaluarla eficiencia en la geometría de la cazoleta debido al cambio en la curvatura que estos generan en el tránsito del flujo a través de este elemento y que influye directamente en las pérdidas por fricción. Mientras que, el análisis para estimar el número óptimo de cazoletas N_b optimiza la manera en que el chorro de la boquilla ingresa a la turbina según el ángulo de separación entre cazoletas y su inferencia en el torque. SE puede considerar, que el análisis de sensibilidad de la Longitud $L_{bucket} [\text{mm}]$ y altura de la cazoleta A_{bucket} se da en un sentido local durante su evaluación (con respecto a la cazoleta únicamente) y posteriormente el impacto se evalúa de manera global con la estimación del número de cazoletas.

De acuerdo con los valores de coeficientes propuestos para la caracterización geométrica de la cazoleta, la selección de dichos valores se planteó para un valor mínimo, medio y máximo, según los valores de los umbrales propuestos por Nechleba (1957). Definidos estos valores, el siguiente paso consiste en modelar los elementos de la turbina y el dominio del fluido (Figuras 6.13 y 6.14) mediante SolidWorks (2019) para su evaluación mediante CFD.

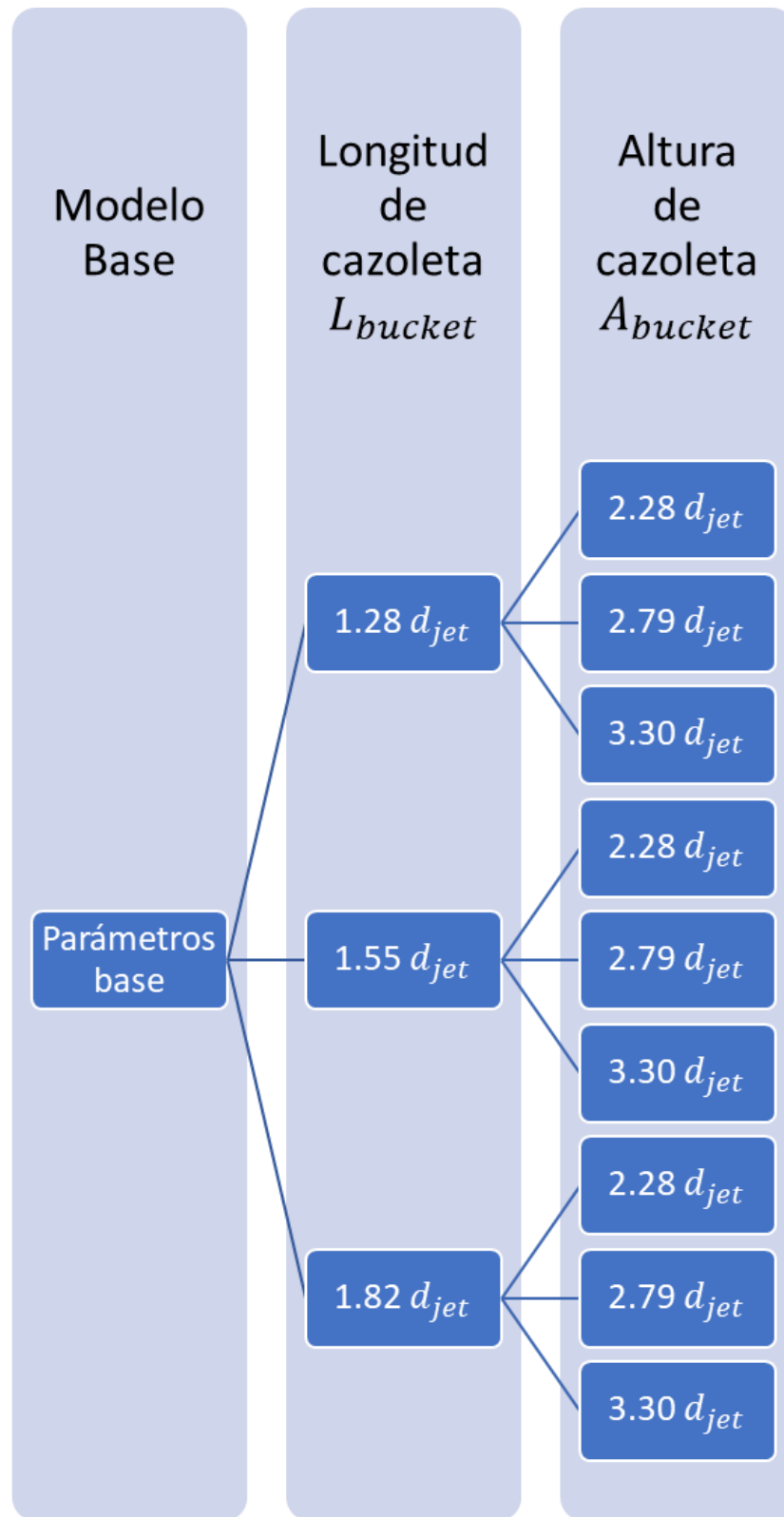


Figura 6.12. Árbol de experimentos para evaluación de turbina Pelton mediante CFD.

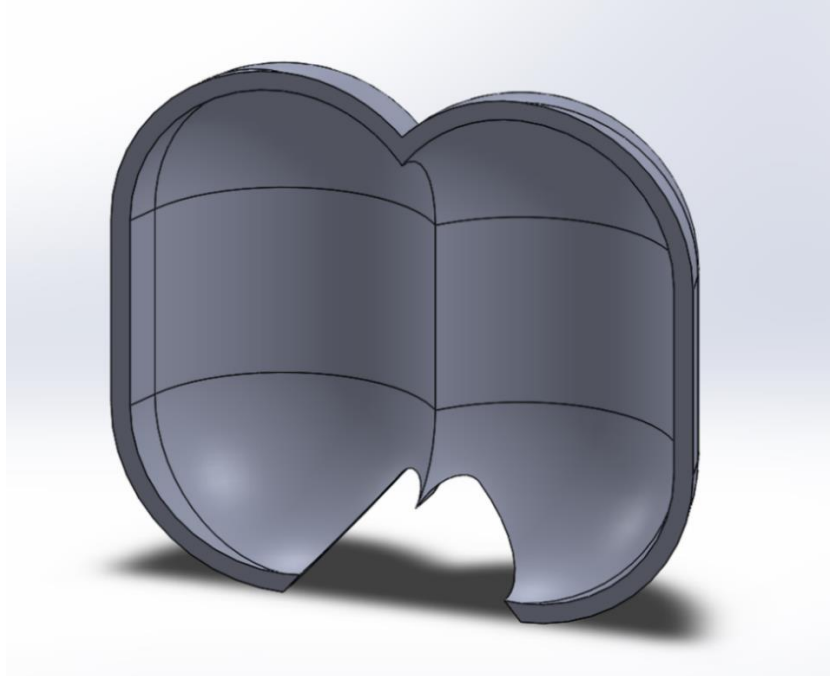


Figura 6.13. Modelación 3D de la cazoleta con valores de parámetros base mediante SolidWorks.

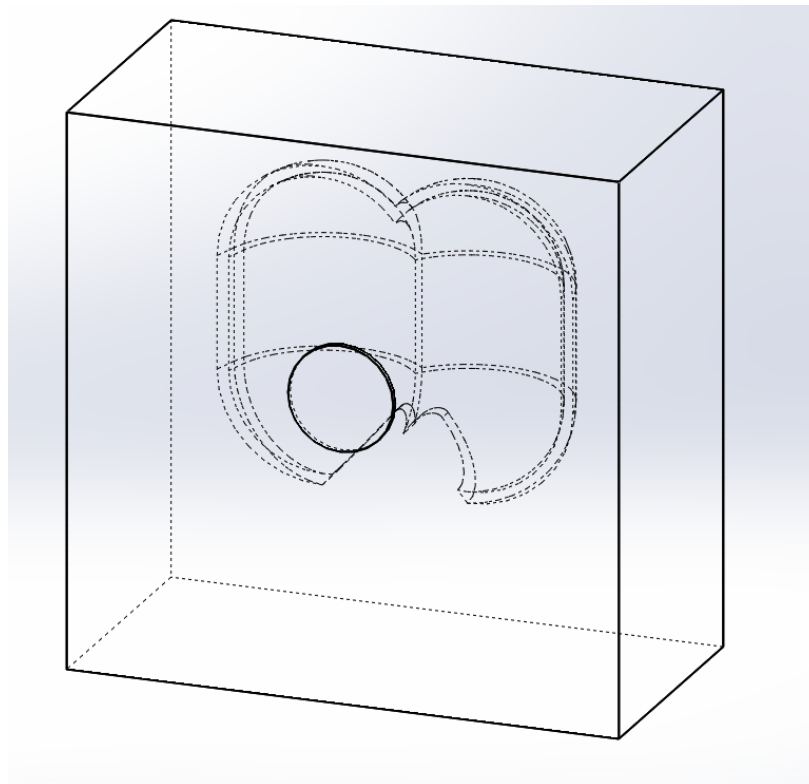


Figura 6.14. Modelo conceptual del dominio del flujo en la cazoleta con valores de parámetros base mediante SolidWorks

El número de parámetros a evaluar (L_{bucket} , A_{bucket} y N_b), el número de valores de coeficientes y los escenarios de operación propuestos genera un número elevado de simulaciones mediante ANSYS-Fluent (81 simulaciones). Por ello, una vez evaluadas las primeras tres configuraciones de cazoleta con el primer parámetro (longitud L_{bucket}) bajo los tres diferentes escenarios se estima su eficiencia mediante el indicador de rendimiento k . Los modelos con un valor mayor de rendimiento son seleccionados, descartando aquella(s) con la eficiencia más baja y se prosiguió con el siguiente parámetro (Altura de la cazoleta). La cantidad de simulaciones se reduce al descartar configuraciones cuya evaluación indica que su incremento en la eficiencia será igual o menor comparado con aquellas que poseen un valor de rendimiento mayor.

Una vez modelado el dominio del fluido de los modelos de cazoletas mediante CAD, se realizó el análisis de sensibilidad mediante CFD. Inicialmente, se declaran las entradas y salidas del dominio para el análisis numérico por continuidad (ecuación 3.2). Posteriormente, se desarrolló la malla del dominio donde se le dio especial atención a la superficie donde el fluido interactúa con la cazoleta para generar un refinamiento en la malla con tal de asegurar una discretización que permita una simulación fiable (Figuras 6.15 y 6.16). Es importante mencionar que, se aplicó el esquema/modelo 'Mixture' debido a la interacción entre dos fluidos (agua y aire) en el dominio.

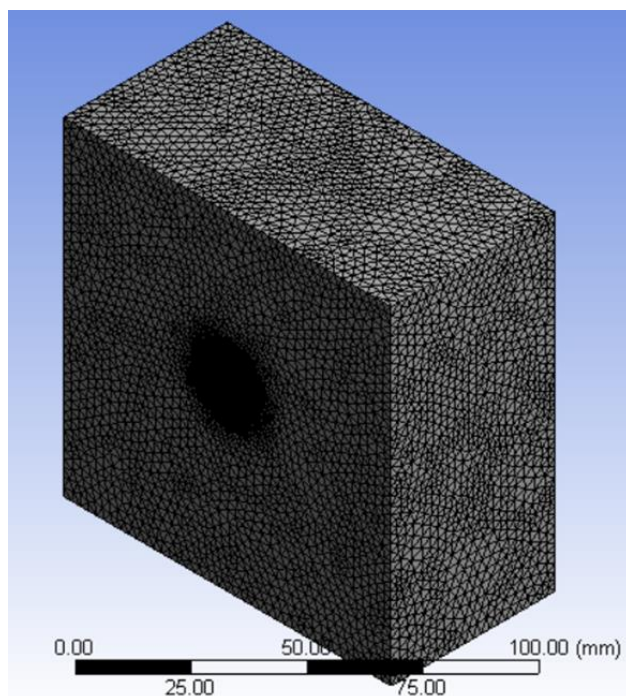


Figura 6.15. Malla del dominio en la región de la cazoleta

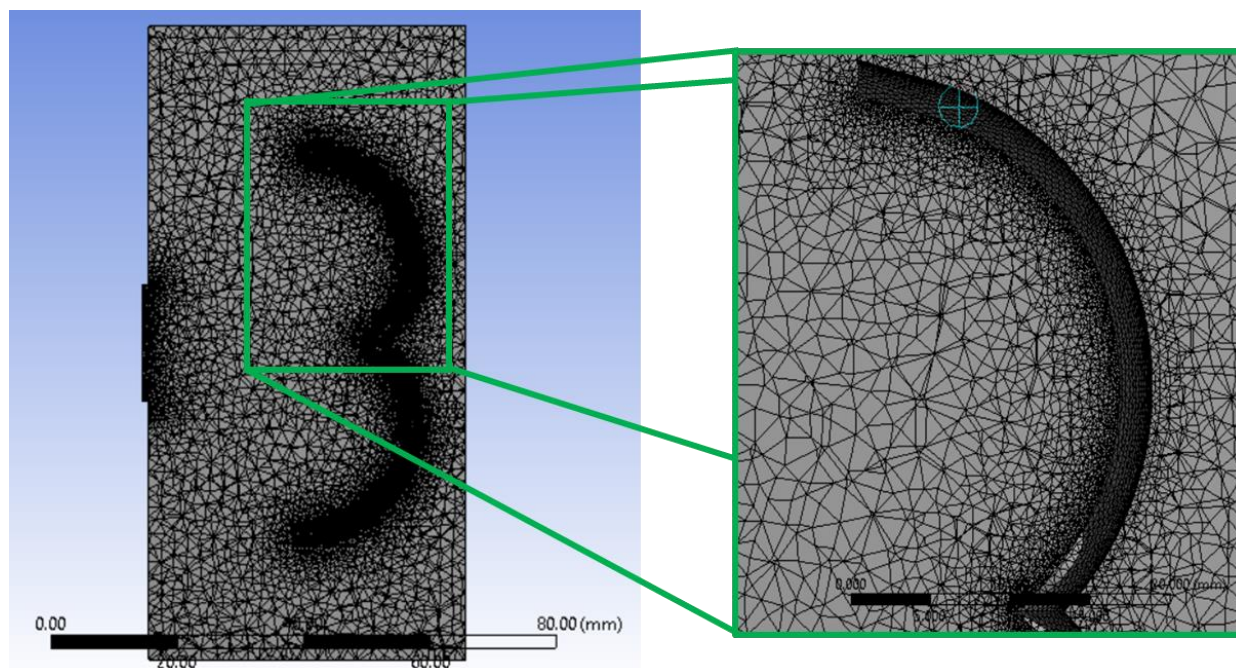


Figura 6.16. Refinamiento de malla en la zona donde el fluido interactúa con la superficie de la cazoleta

Los resultados de modelación numérica del primer parámetro, longitud L_{bucket} , se muestran en la Tabla 6.9 y en Anexo 3. La denominación de los modelos siguió la estructura “Bucket_ Xd_{jet} _ Yd_{jet} ”, donde Xd_{jet} representa el valor de coeficiente utilizado para la longitud de la cazoleta L_{bucket} y Yd_{jet} representa el valor de coeficiente utilizado para la altura de la cazoleta A_{bucket} . El modelo de cazoleta ‘Bucket_1.82 d_{jet} _2.79 d_{jet} ’ mostró los mayores valores de rendimiento comparado con los dos modelos restantes ($k_{med} = 0.4967$). Además, el valor de desviación estándar de la cazoleta fue menor comparado con el modelo ‘Bucket_1.55 d_{jet} _2.79 d_{jet} ’ que se traduce en una menor variación en la velocidad del chorro a la salida de la turbina.

Es importante mencionar que, el análisis de sensibilidad mediante CFD mostró que el modelo de cazoleta ‘Bucket_1.28 d_{jet} _2.79 d_{jet} ’ presenta vórtices en el dominio de la cazoleta debido al bajo valor de longitud de la cazoleta L_{bucket} ($1.28 d_{jet} = 24.38 \text{ mm}$). La presencia de vorticidad se dio en los escenarios de operación medio ($H_T = 6.0 \text{ m}$) y máximo ($H_T = 10.0 \text{ m}$). El bajo valor de longitud propicia un incremento en la aceleración angular del flujo debido a la curvatura en este modelo y causa que el flujo de salida intercepte con el flujo de entrada, que se traduce en una reducción de la velocidad en el chorro de entrada (Figuras 6.15, 6.16, 6.17 y 6.18). La configuración de este modelo de geometría de cazoleta es descartada debido a las pérdidas generadas por el fenómeno descrito y la imposibilidad de estimar el rendimiento del modelo.

Tabla 6.9. Resultados obtenidos del rendimiento de la cazoleta mediante CFD para el parámetro L_{bucket}

	Configuración geométrica de la cazoleta	Escenario	Carga hidráulica [m]	Velocidad del chorro [m/s]	Velocidad de salida [m/s]	Coefficiente k	Media coeficiente k_{med}	Desviación Estándar [m/s]	Modelo viable
Longitud de cazoleta L_{bucket}	Bucket_1.55 d_{jet} _2.79 d_{jet}	Mínimo	4.5	8.64	4.24	0.4907	0.4742	0.0153	Viable
		Medio	6.0	10.01	4.72	0.4715			
		Máximo	10.0	12.90	5.94	0.4605			
	Bucket_1.28 d_{jet} _2.79 d_{jet}	Mínimo	4.5	8.64	4.05	0.4688	ND	ND	No viable
		Medio	6.0	10.01	ND	ND			
		Máximo	10.0	12.90	ND	ND			
	Bucket_1.82 d_{jet} _2.79 d_{jet}	Mínimo	4.5	8.64	4.34	0.5023	0.4967	0.0051	Viable
		Medio	6.0	10.01	4.96	0.4955			
		Máximo	10.0	12.90	6.35	0.4922			

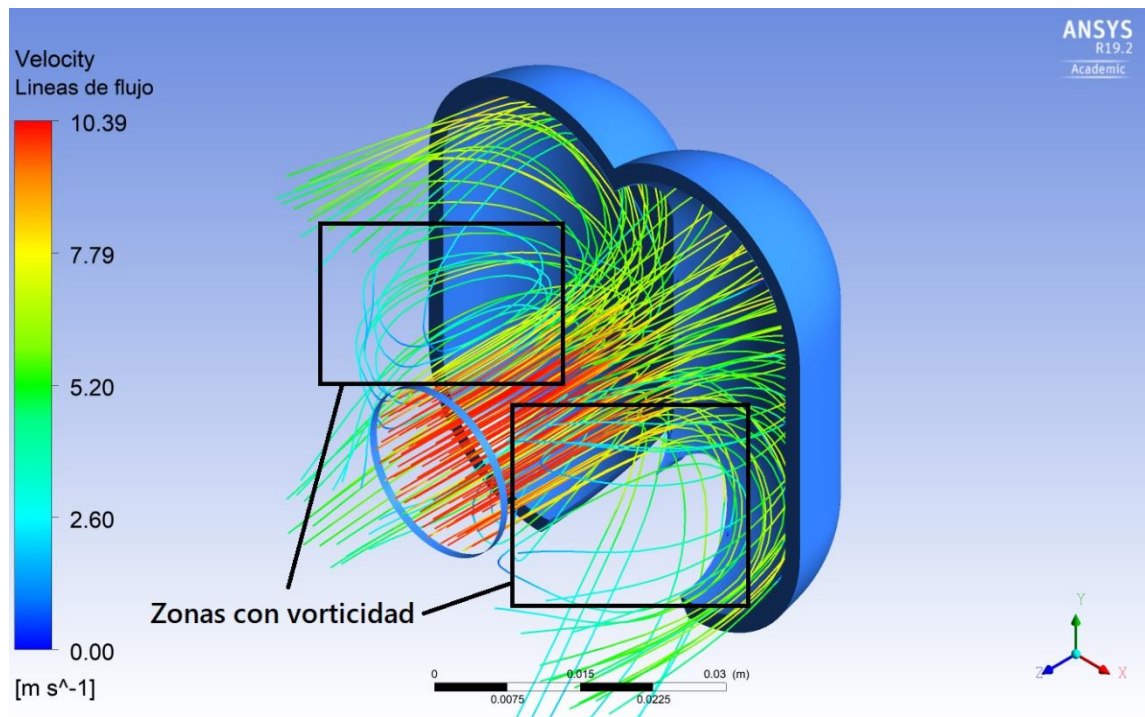


Figura 6.15. Presencia de vorticidad en el modelo de cazoleta 'Bucket_1.28 d_{jet} -2.79 d_{jet} ' para condiciones medias de operación ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$); Vista isométrica

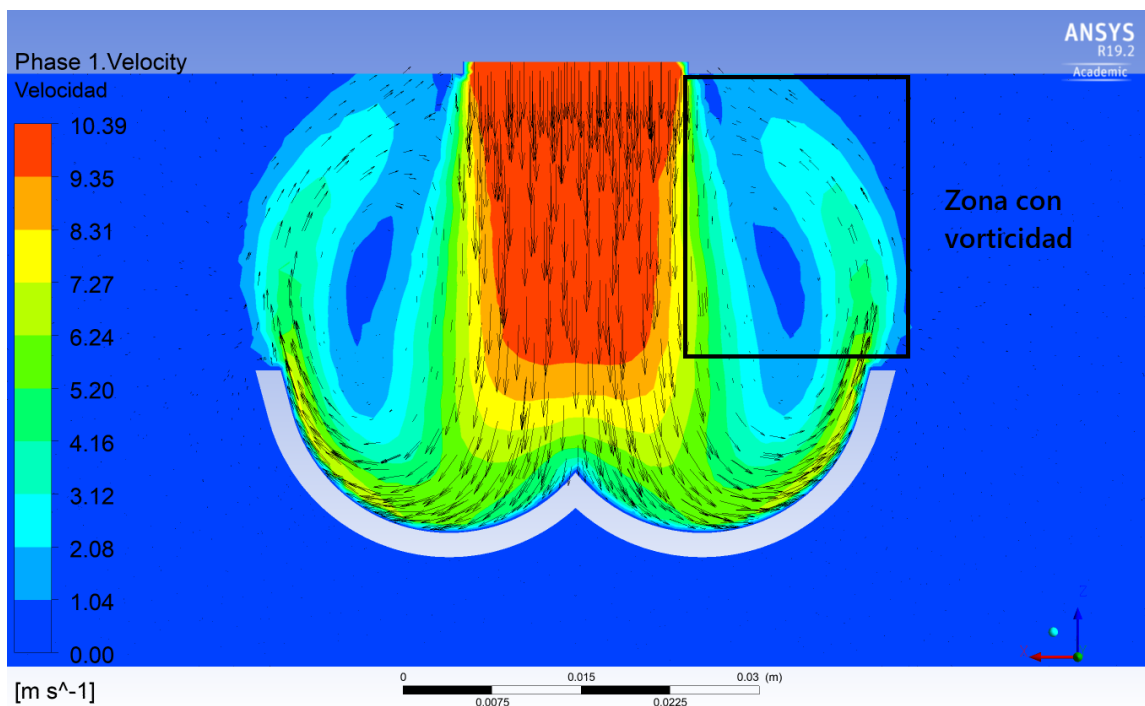


Figura 6.16. Presencia de vórtices debido a la curvatura en el modelo de cazoleta 'Bucket_1.28 d_{jet} -2.79 d_{jet} ' para condiciones medias de operación ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$); Vista superior

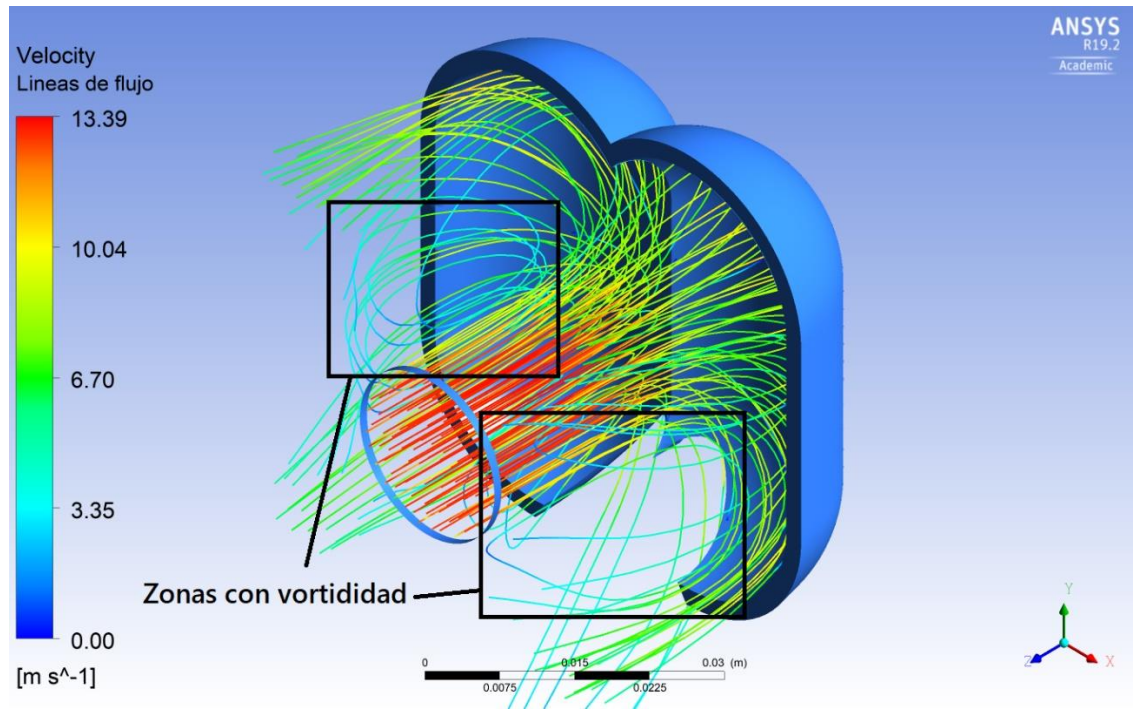


Figura 6.17. Presencia de vorticidad en el modelo de cazoleta 'Bucket_1. $28d_{jet}$ - $2.79d_{jet}$ ' para condiciones máximas de operación ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}$, $H_T = 10.0 m$); Vista isométrica

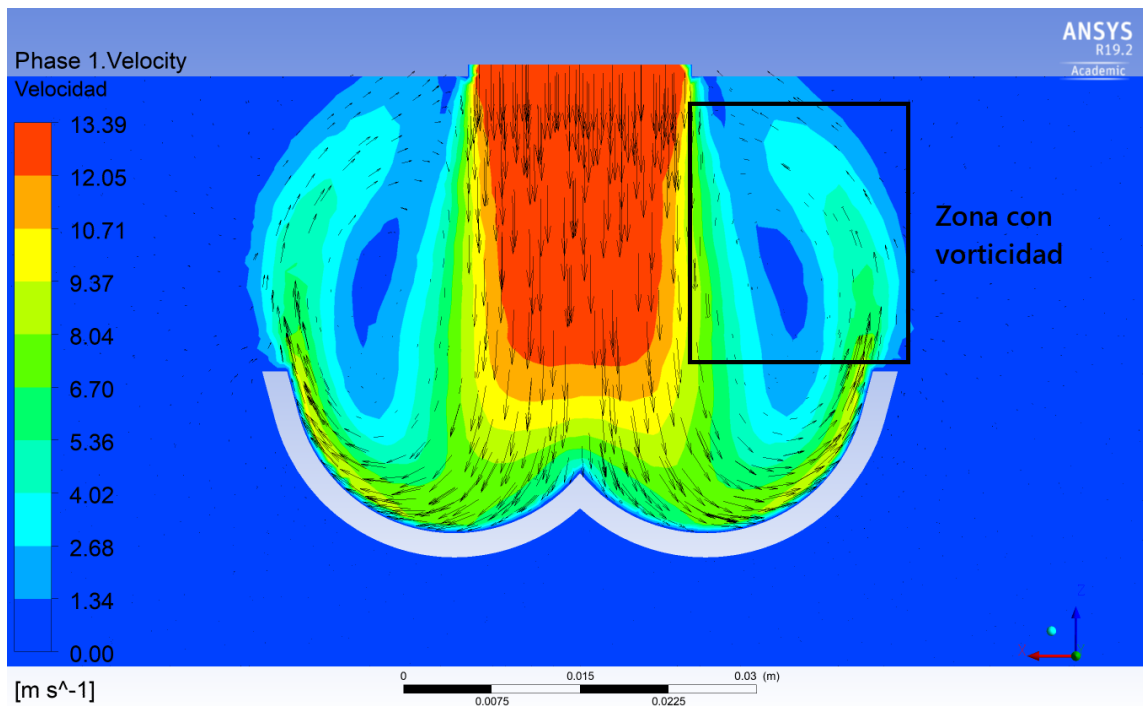


Figura 6.18. Presencia de vórtices debido a la curvatura en el modelo de cazoleta 'Bucket_1. $28d_{jet}$ - $2.79d_{jet}$ ' para condiciones máximas de operación ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$); Vista superior

Al realizar las simulaciones del primer parámetro (L_{bucket}), se revisó la convergencia de los esquemas de solución mediante los valores de los residuales de cada término de las ecuaciones de continuidad, *momentum* y turbulencia (figura 6.19) a 3 000 iteraciones para cada escenario. Los resultados numéricos calculados por el software, el número de iteraciones en donde se observó la inexistencia significativa de variación se presentó a partir de 1 500 iteraciones en los tres escenarios.

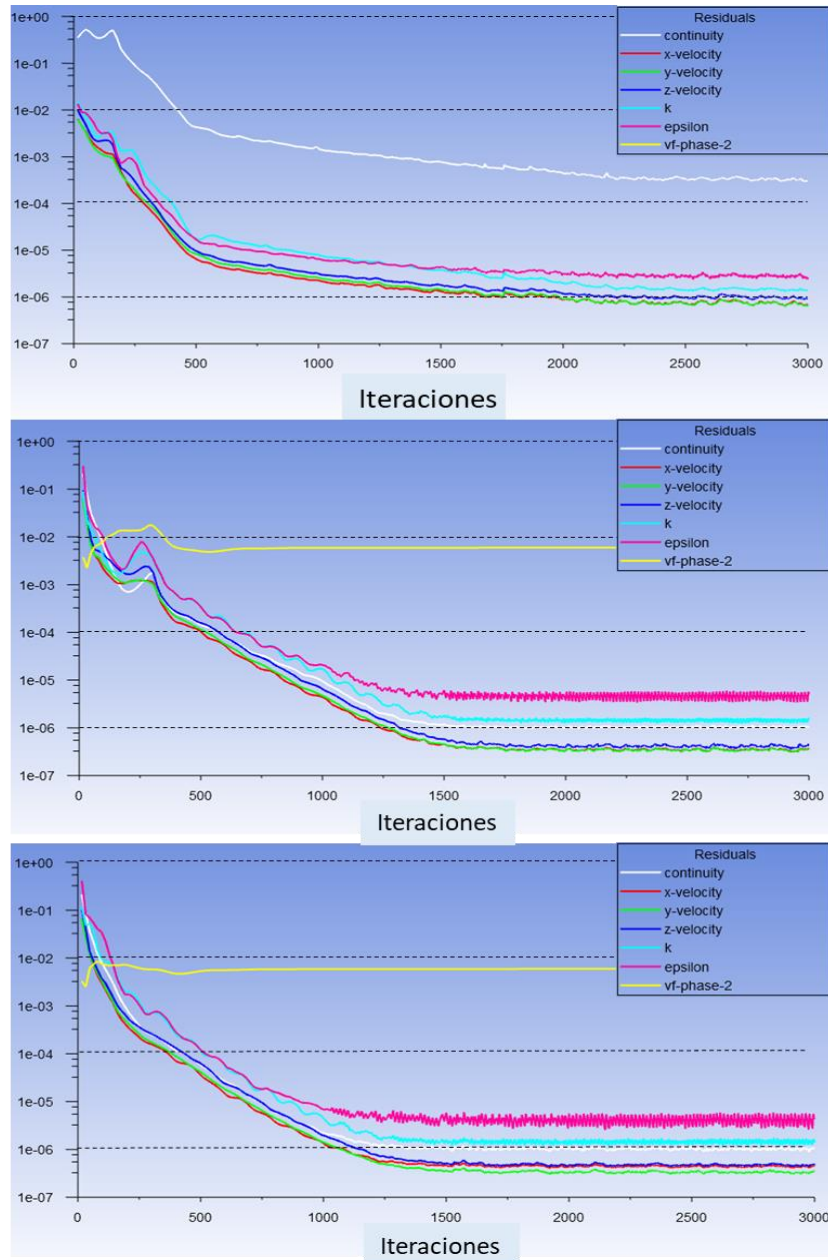


Figura 6.19. Grafica de residuales de la simulación del modelo 'Bucket_1.28 d_{jet} _2.79 d_{jet} ' bajo los escenarios propuestos

Posteriormente, se evaluaron las configuraciones posibles con el segundo parámetro propuesto, la altura de cazoleta A_{bucket} . A partir de los dos modelos resultantes de la evaluación del primer parámetro ('Bucket_1.55 d_{jet} _2.79 d_{jet} ' y 'Bucket_1.88 d_{jet} _2.79 d_{jet} '), se modelaron las combinaciones restantes con un total de 6 modelos posibles. Esta simulación se realizó bajo los mismos lineamientos de la evaluación del primer parámetro con la definición del dominio del fluido en el modelo, la generación de malla y las condiciones de frontera de acuerdo con los escenarios de operación. Los resultados del análisis numérico para estas configuraciones geométricas se muestran en la Tabla 6.10.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los modelos con mejores valores de rendimiento son los modelos 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.79 d_{jet} ', 'Bucket_1.55 d_{jet} _2.28 d_{jet} ' y 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} '. Los cuales presentaron una media de rendimiento k_{med} de 0.4967, 0.5370 y 0.5643, respectivamente. De acuerdo con los valores de rendimiento, el modelo óptimo a utilizar es 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} '.

Sin embargo, previamente se mencionó que, los resultados obtenidos por el coeficiente de rendimiento k pueden no poseer diferencias significativas y ser un medio insuficiente para determinar si el modelo con el valor más alto del coeficiente se traduce como el óptimo. Por ello se realiza una prueba de hipótesis estadística (ecuaciones 4.13, 4.14 y 4.15) para analizar los resultados obtenidos de la cazoleta con mejor valuación del indicador k (Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet}) con las dos siguientes cazoletas mejor evaluadas (Bucket_1.82 d_{jet} _2.79 d_{jet} y Bucket_1.55 d_{jet} _2.28 d_{jet}).

La Tabla 6.11 muestra el análisis estadístico entre los resultados de los modelos 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} ' y 'Bucket_1.55 d_{jet} _2.28 d_{jet} '. La Tabla 6.12 muestra el análisis estadístico entre los resultados de los modelos 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} ' y 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.79 d_{jet} '. De acuerdo con los resultados, se puede apreciar que la hipótesis de la prueba número 1 fue rechazada. Lo cual indica que no existen diferencias significativas entre la comparación entre los dos modelos. Por otro lado, la hipótesis de la prueba número 2 es aceptada por lo que los resultados del modelo 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} ' si poseen diferencias significativas con el modelo 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.79 d_{jet} '.

Tabla 6.10. Resultados obtenidos del rendimiento de la cazoleta mediante CFD para los dos parámetros evaluados

	Configuración de cazoleta	Escenario	Carga hidráulica [m]	Velocidad del chorro $\left[\frac{m}{s}\right]$	Velocidad de salida $\left[\frac{m}{s}\right]$	Coefficiente k	Media $\left[\frac{m}{s}\right]$	Desviación Estándar $\left[\frac{m}{s}\right]$	Viabilidad
Longitud de cazoleta L_{bucket}	Bucket_1.55 d_{jet} _2.79 d_{jet}	Mínimo	4.5	8.64	4.24	0.4907	0.4742	0.0153	No viable
		Medio	6.0	10.01	4.72	0.4715			
		Máximo	10.0	12.90	5.94	0.4605			
	Bucket_1.82 d_{jet} _2.79 d_{jet}	Mínimo	4.5	8.64	4.34	0.5023	0.4967	0.0051	Viable
		Medio	6.0	10.01	4.96	0.4955			
		Máximo	10.0	12.90	6.35	0.4922			
Altura de cazoleta A_{bucket}	Bucket_1.55 d_{jet} _2.28 d_{jet}	Mínimo	4.5	8.64	4.64	0.5370	0.5370	0.0005	Viable
		Medio	6.0	10.01	5.38	0.5375			
		Máximo	10.0	12.90	6.92	0.5364			
	Bucket_1.55 d_{jet} _3.30 d_{jet}	Mínimo	4.5	8.64	4.10	0.4745	0.4712	0.0066	No viable
		Medio	6.0	10.01	4.76	0.4755			
		Máximo	10.0	12.90	5.98	0.4636			
	Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet}	Mínimo	4.5	8.64	4.94	0.5718	0.5643	0.0076	Viable
		Medio	6.0	10.01	5.65	0.5644			
		Máximo	10.0	12.90	7.18	0.5566			
	Bucket_1.82 d_{jet} _3.30 d_{jet}	Mínimo	4.5	8.64	3.89	0.4502	0.4469	0.0029	No viable
		Medio	6.0	10.01	4.46	0.4456			
		Máximo	10.0	12.90	5.74	0.4450			

Tabla 6.11. Resultados de análisis de prueba de hipótesis para los modelos de cazoletas 'Bucket_1.82d_{jet}_2.28d_{jet}' y 'Bucket_1.82d_{jet}_2.79d_{jet}'

Prueba de hipótesis 1			
	Valor de k en el escenario mínimo	Valor de k en el escenario medio	Valor de k en el escenario máximo
Bucket_1.82 <i>d</i> _{jet} _2.28 <i>d</i> _{jet}	0.5718	0.5644	0.5566
Bucket_1.82 <i>d</i> _{jet} _2.79 <i>d</i> _{jet}	0.5370	0.5375	0.5364
Desviación estándar Sd	0.04987619		
Valor estadístico t_n	0.94747179		
Valor critico t_c	2.92		
Por lo tanto, se rechaza la hipótesis			

Tabla 6.12. Resultados de análisis de prueba de hipótesis para los modelos de cazoletas 'Bucket_1.82d_{jet}_2.28d_{jet}' y 'Bucket_1.55d_{jet}_2.28d_{jet}'

Prueba de hipótesis 2			
	Valor de k en el escenario mínimo	Valor de k en el escenario medio	Valor de k en el escenario máximo
Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet}	0.5718	0.5644	0.5566
‘Bucket_1.82 d_{jet} _2.79 d_{jet} ’	0.5023	0.4955	0.4922
Desviación estándar Sd	0.002809		
Valor estadístico t_n	41.6510		
Valor critico t_c	2.92		
Por lo tanto, se aprueba la hipótesis			

Un criterio adicional para la selección del modelo de cazoleta es la cantidad de material necesario para su manufactura. La Tabla 6.13 muestra la cantidad de filamento necesario para la construcción de los tres modelos con mejor rendimiento. El modelo 'Bucket_1.55 d_{jet} _2.28 d_{jet} ' es el modelo que requiere menor cantidad de material (12.53 cm^3) y su media de rendimiento es la segunda más alta comparada con el de los dos modelos restantes ($k = 0.5370$). Por otro lado, el modelo 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} ' posee el valor más alto de rendimiento, pero requiere más material comparado con la cazoleta 'Bucket_1.55 d_{jet} _2.28 d_{jet} '. Considerando estas condiciones, se empleó el modelo de 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} ' por poseer el valor más alto y no requerir una cantidad considerable de material para su manufactura.

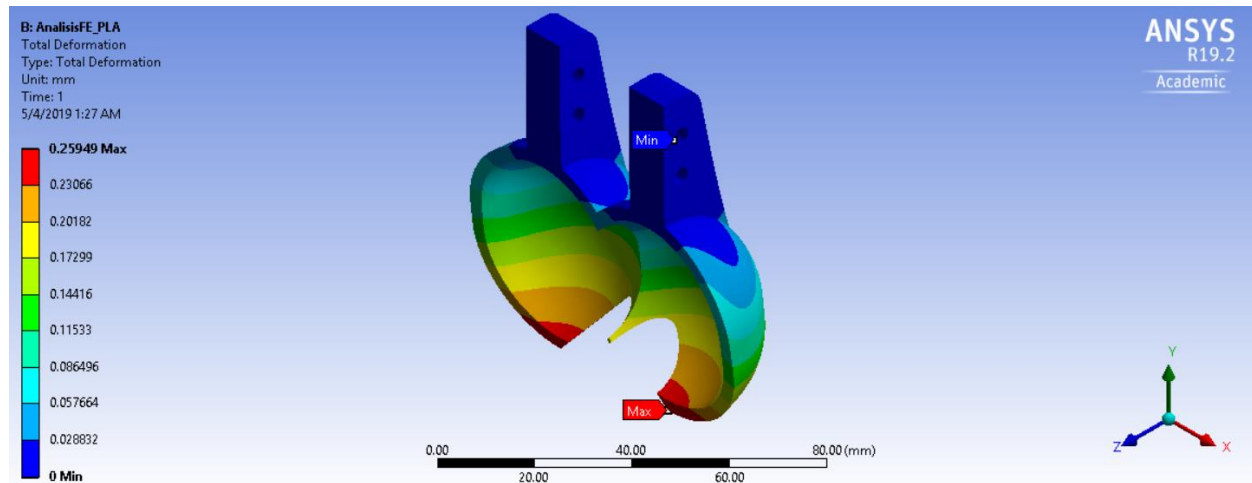
Tabla 6.13. Cantidad de material necesario para la impresión de los modelos de cazoletas seleccionados

Configuración de cazoleta	Cantidad de material [cm^3]	Peso estimado para PLA [g]	Peso estimado para ABS [g]	Media Coeficiente k
Bucket_1.82d_{jet}_2.79d_{jet}	16.66	20.66	17.33	0.4967
Bucket_1.55d_{jet}_2.28d_{jet}	12.53	15.53	13.03	0.5370
Bucket_1.82d_{jet}_2.28d_{jet}	14.70	18.23	15.29	0.5643

Una vez definida la geometría de la cazoleta, se realizó un análisis fluido-estructura (FSI) para estimar la deformación de la cazoleta para seleccionar el material en función de su resistencia a los esfuerzos generados por el impacto del chorro y el tránsito del fluido a través de la cazoleta. A partir de los campos de presión estimados por el software para el modelo de cazoleta 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} ', se evaluó la deformación y concentración de esfuerzos en la geometría según las propiedades mencionadas en la Tabla 4.4 de los materiales propuestos (Figuras 6.20 y 6.21). Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 6.14 y el anexo 4. Los valores obtenidos del análisis mostraron una menor deformación por parte del PLA a comparación del ABS. Sin embargo, el análisis muestra un alto valor de deformación en condiciones extremas (0.4311 mm para PLA y 0.5388 mm para ABS) por lo que el punto de fractura pudiese producirse antes de los esperado si se utiliza esta configuración.

Tabla 6.14. Resultados obtenidos del análisis fluido estructura en la cazoleta

Material	Propiedad	Escenario medio $H_T = 6.0\text{ m}$		Escenario máximo $H_T = 10.0\text{ m}$	
		Promedio	Máxima	Promedio	Máxima
PLA	Deformación	0.0082 mm	0.2595 mm	0.1366 mm	0.4311 mm
	Esfuerzo equivalente (Von Mises)	0.7693 MPa	5.83 MPa	1.27 MPa	9.68 MPa
ABS	Deformación	0.1027 mm	0.3243 mm	0.1707 mm	0.5388 mm
	Esfuerzo equivalente (Von Mises)	0.7703 MPa	5.83 MPa	1.28 MPa	9.70 MPa


Figura 6.20. Análisis de deformación de la cazoleta para el escenario medio de operación considerando PLA como material de manufactura

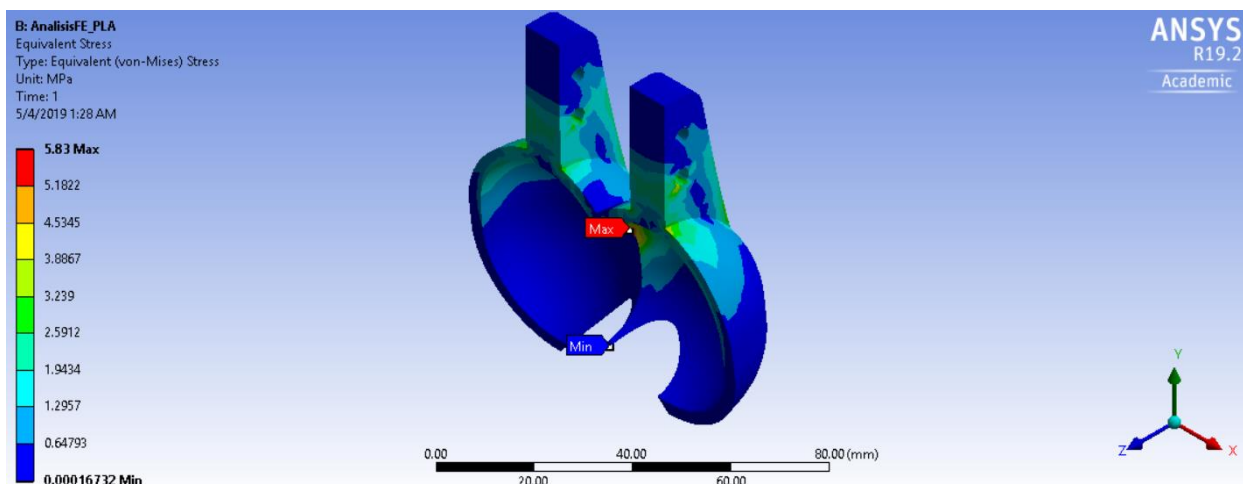


Figura 6.21. Estimación de esfuerzos en la estructura de la cazoleta para el escenario medio de operación considerando PLA como material de manufactura

La modificación de la cazoleta plantea aumentar el grosor de pared de la cazoleta para incrementar su resistencia teniendo en cuenta que, al tratarse de un sistema dinámico, los esfuerzos dinámicos pueden ir desgastando la estructura de la cazoleta hasta el punto de fractura en un periodo corto de tiempo. Por ello, se modificó el grosor de la pared de 3.05 *mm*, inicialmente, a 5.0 *mm* (Figura 6.22). Los resultados del análisis se pueden apreciar en la Tabla 6.15 y en el anexo 4. Se aprecia una reducción notable en los valores de deformación para ambos materiales (Figuras 6.23 y 6.24), lo cual, garantiza un mayor grado de seguridad ante condiciones extremas de operación. Considerando la deformación esperada, los valores de esfuerzos aplicados y las modificaciones a la estructura se empleó PLA para su construcción considerando que su deformación es menor comparada con ABS.

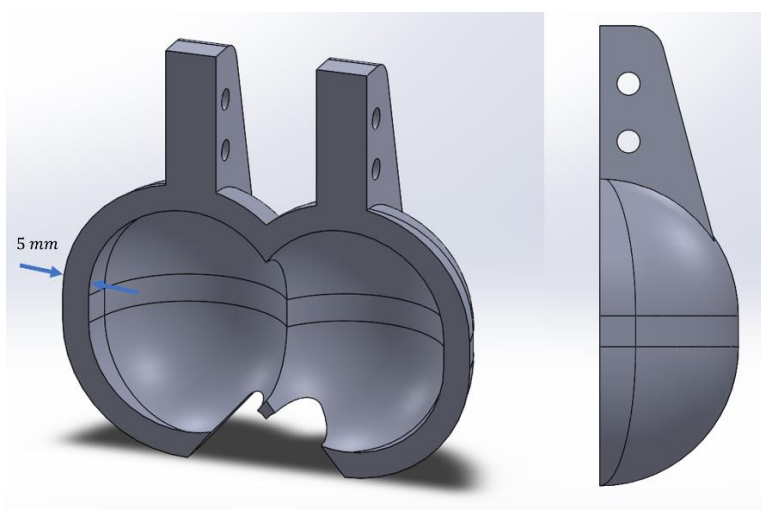
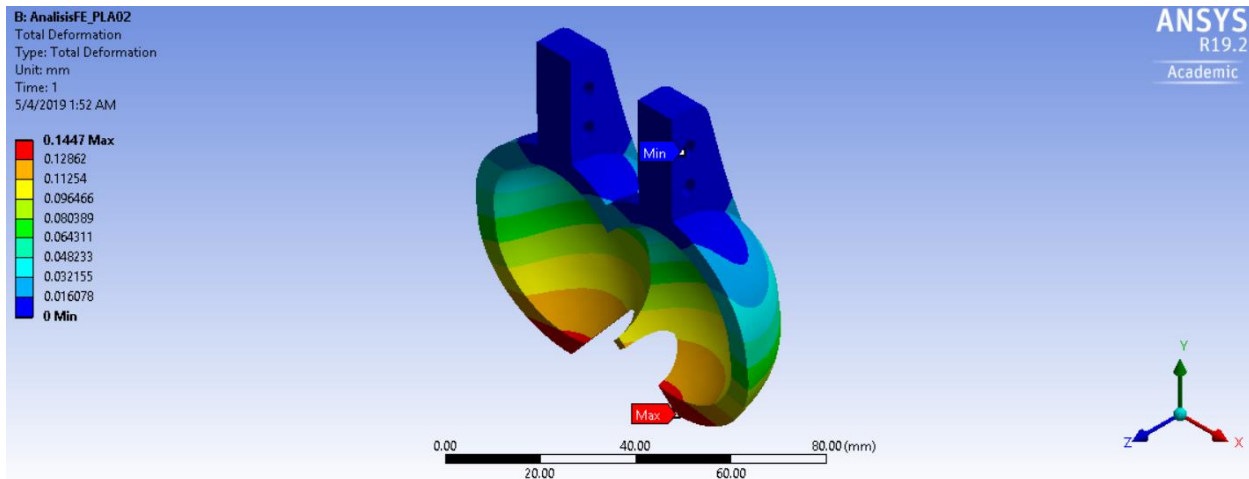


Figura 6.22. Modelación de cazoleta con espesor de pared de 5 *mm*

Tabla 6.15. Resultados obtenidos del análisis fluido estructura en la cazoleta

Material	Propiedad	Escenario medio $H_T = 6.0\text{ m}$		Escenario máximo $H_T = 10.0\text{ m}$	
		Promedio	Máxima	Promedio	Máxima
PLA	Deformación	0.0082 mm	0.2595 mm	0.1366 mm	0.4311 mm
	Esfuerzo equivalente (Von Mises)	0.7693 MPa	5.83 MPa	1.27 MPa	9.68 MPa
ABS	Deformación	0.1027 mm	0.3243 mm	0.1707 mm	0.5388 mm
	Esfuerzo equivalente (Von Mises)	0.7703 MPa	5.83 MPa	1.28 MPa	9.70 MPa


Figura 6.23. Análisis de deformación de la cazoleta modificada para el escenario medio de operación considerando PLA como material de manufactura

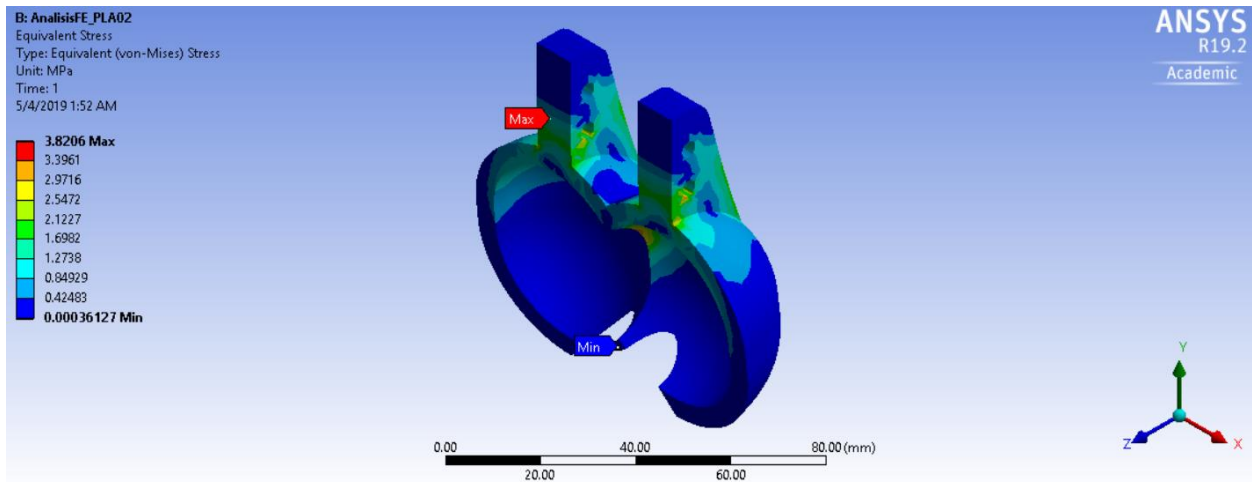


Figura 6.24. Estimación de esfuerzos en la estructura de la cazoleta para el escenario medio de operación considerando PLA como material de manufactura

Finalmente, la última parte del análisis de sensibilidad consiste en determinar el número óptimo de cazoletas en el rodete de la turbina. De acuerdo con los valores estimados de diámetro del chorro $d_{jet} = 19.05 \text{ mm}$, el radio de turbina $r_{turbina} = 0.2002 \text{ m}$ y las relaciones empíricas propuestas por Nechleba, Einsering y Nasir (ecuaciones 4.10, 4.11 y 4.12, respectivamente) se estimaron los números de cazoletas para evaluar con la configuración de cazoleta definida mediante ANSYS-Fluent (Tabla 6.16).

Tabla 6.16. Número de cazoletas estimados de acuerdo con relaciones empíricas

ID	Autor	Número de cazoletas N_b	Angulo de separación entre cazoletas θ_{bucket}
1	Nechleba	28	12.85°
2	Einsering	33	10.91°
3	Nasir	26	13.84°

A partir de los números de cazoletas estimados y la configuración de cazoleta seleccionada se realizó la modelación mediante SolidWorks de un segmento de la turbina compuesto por tres cazoletas con su respectivo ángulo de separación para definir el dominio del fluido (Figura 6.25). Posteriormente, definido el dominio se inicia de proceso de mallado y realizar el análisis numérico de manera fiable (Figura 6.26). Al igual que en la evaluación de la cazoleta, se realizó un refinamiento de la malla en las regiones donde el fluido transita (Figura 6.27). Es importante mencionar que para este conjunto de simulaciones se aplicó la función 'Mixture' debido a la interacción entre aire y agua en el dominio. Los valores de frontera (velocidad de entrada, presión, etc.) están definidas por los valores obtenidos de los escenarios de operación.

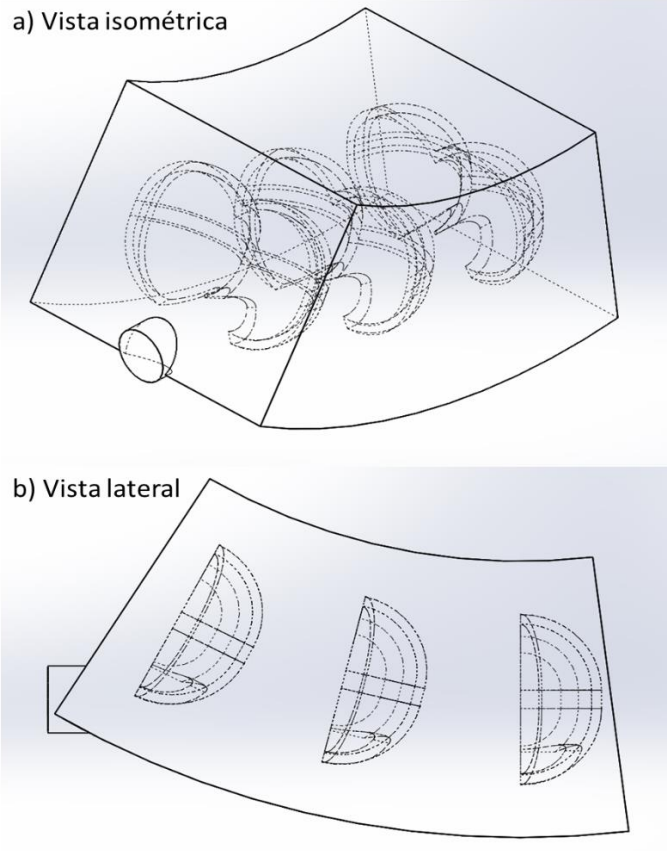


Figura 6.25. Modelación del dominio del fluido para la estimación del número de cazoletas: a) Vista isométrica y b) vista lateral

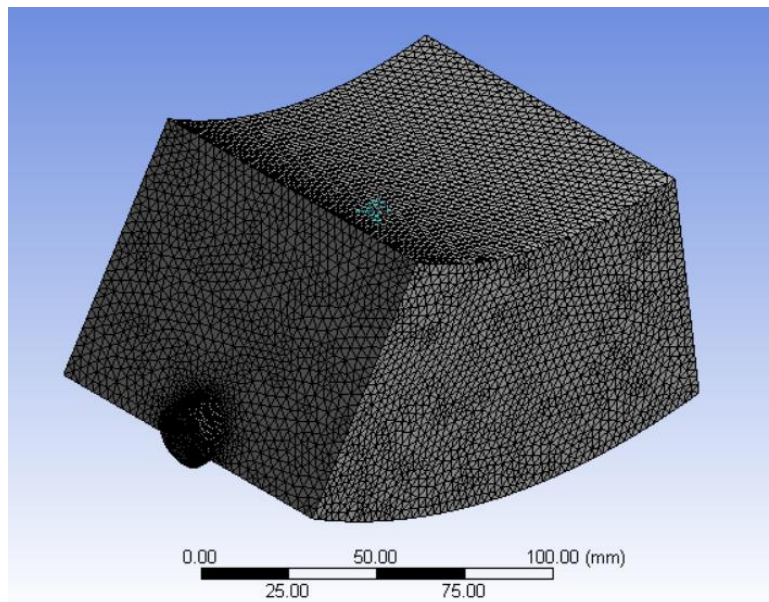


Figura 6.26. Malla del dominio del fluido para la estimación del número de cazoletas

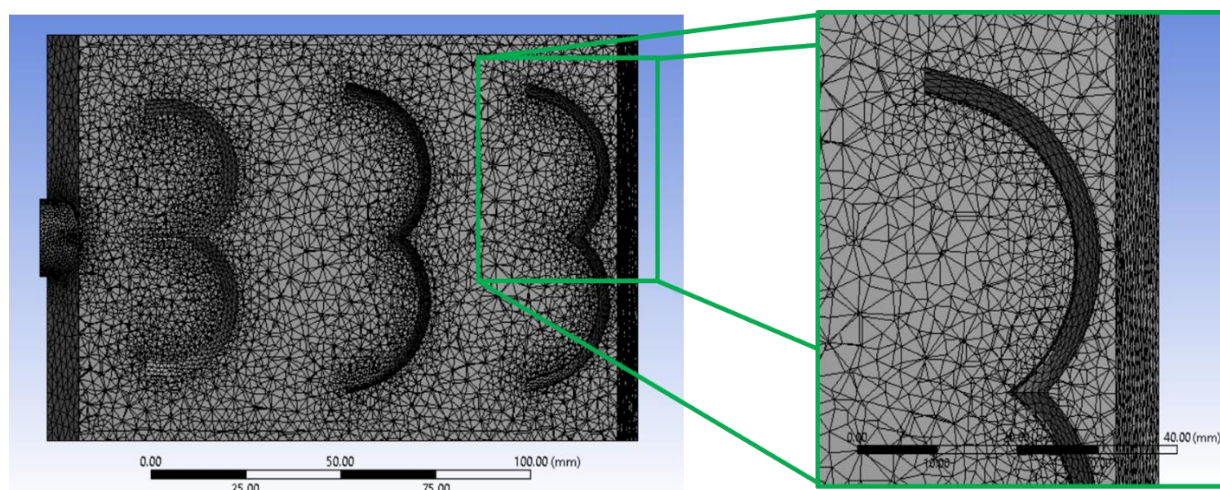


Figura 6.27. Refinamiento de la región de las superficies donde el flujo interactúa con la cazoleta

Los resultados obtenidos del análisis numérico mediante ANSYS-Fluent para los diferentes números de cazoletas propuestos para los diferentes escenarios de operación esperados se pueden apreciar en la Tabla 6.18 y en Anexo 3. Para la selección del número de cazoletas se consideró el valor de torque generado y la cantidad de material necesario para construir el número de cazoletas (Tabla 6.17). Es importante destacar que el número estimado mediante el método de Einsering (ecuación 4.11) es la alternativa con el valor más alto de torque ($\bar{T} = 12.62 \text{ N} \cdot \text{m}$; Figuras 6.28). Sin embargo, requiere de una cantidad de material mayor comparado con las dos opciones restantes. Por ello, se empleó el número estimado por el método de Nasir (26 cazoletas; Figura 6.29) debido a que la diferencia de torque con respecto al de Einsering no es significativa y requiere la menor de cantidad de material de los tres métodos (510.32 g).

Tabla 6.17. Cantidad de material necesario de acuerdo con el número de cazoletas

Número de cazoletas	Volumen de cazoleta [cm^3]	Peso estimado en PLA [g]	Material necesario [g]	Media Torque [$\text{N} \cdot \text{m}$]
26	14.69	18.22	510.32	12.19
28	14.69	18.22	601.45	11.71
33	14.69	18.22	729.03	12.62

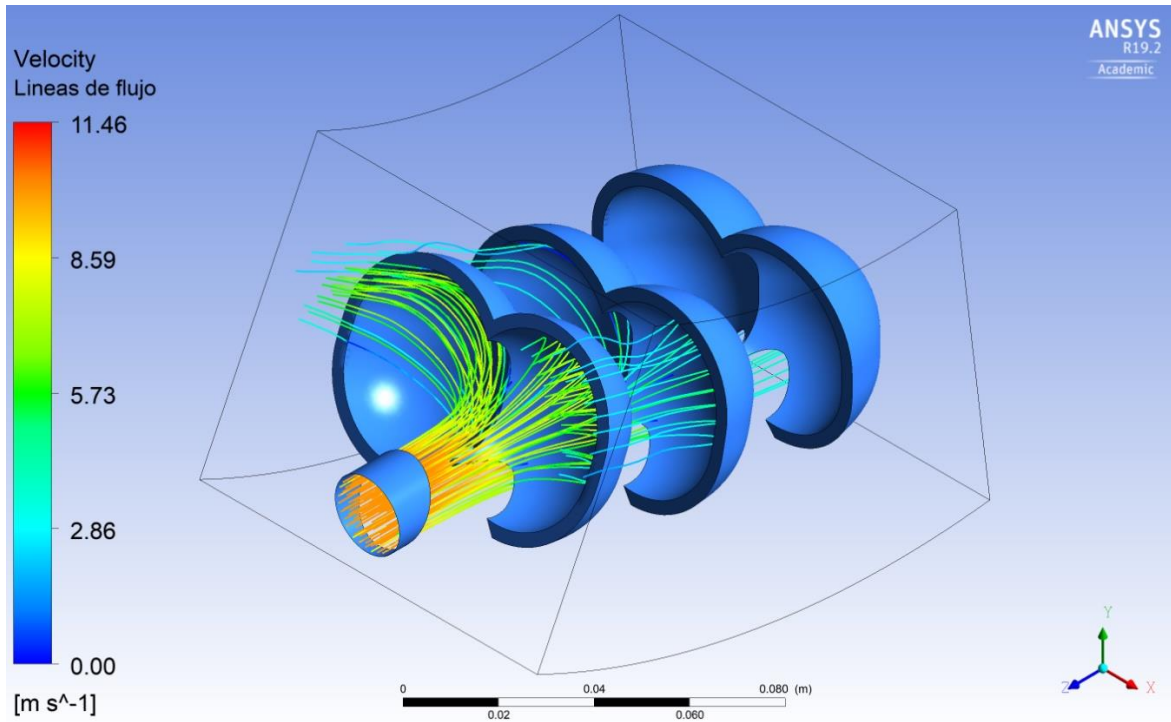


Figura 6.28. Líneas de flujo para la configuración de 33 cazoletas en el rotor bajo el escenario medio de operación ($H_T = 6.0m$, $V_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$)

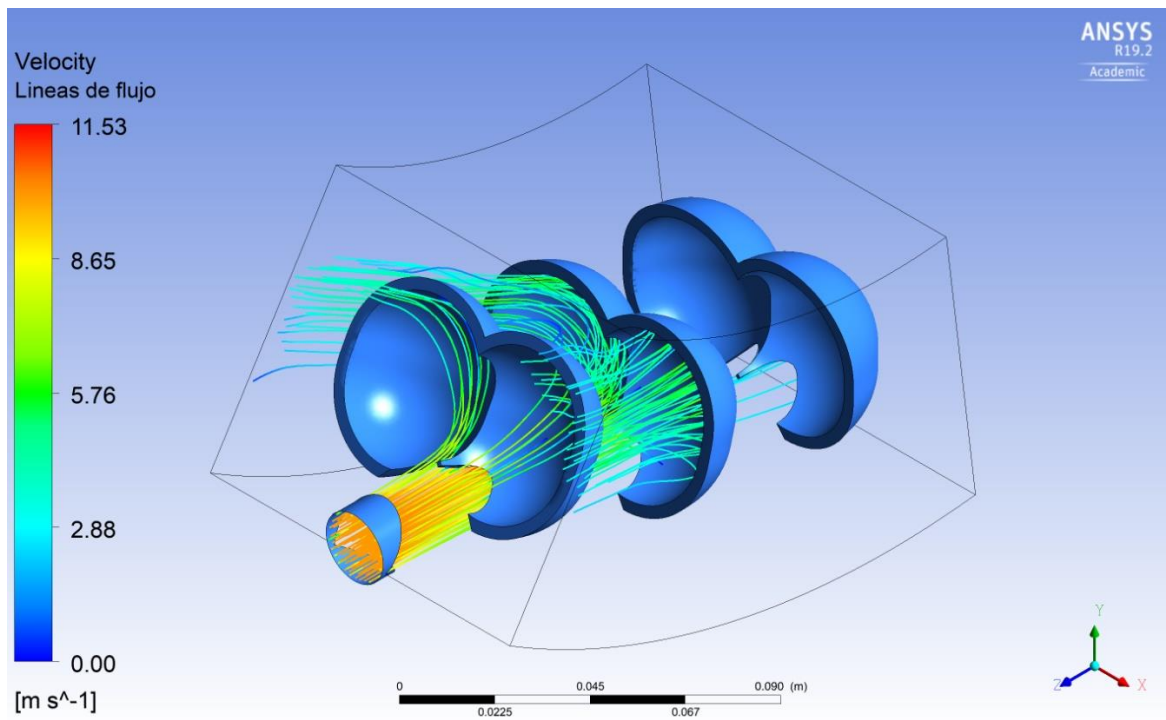


Figura 6.29. Líneas de flujo para la configuración de 26 cazoletas en el rotor bajo el escenario medio de operación ($H_T = 6.0m$, $V_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$)

Tabla 6.18. Resultados obtenidos del rendimiento de la turbina de acuerdo con el número de cazoletas

	Número de cazoletas	Escenario	Carga hidráulica [m]	Velocidad del chorro $\left[\frac{m}{s}\right]$	Torque generado $[N \cdot m]$	Media $[N \cdot m]$	Desviación Estándar $[N \cdot m]$	Viabilidad
Número de cazoletas	26 Cazoletas	Mínimo	4.5	8.64	6.34	9.6524	4.0153	No Viable
		Medio	6.0	10.01	8.50			
		Máximo	10.0	12.90	14.12			
	28 Cazoletas	Mínimo	4.5	8.64	6.20	9.4400	3.9254	Viable
		Medio	6.0	10.01	8.32			
		Máximo	10.0	12.90	13.80			
	33 Cazoletas	Mínimo	4.5	8.64	6.48	9.8526	4.0648	No viable
		Medio	6.0	10.01	8.71			
		Máximo	10.0	12.90	14.37			

6.5. Construcción de prototipos seleccionados

La construcción de prototipos consiste en la manufactura e instalación de los elementos que integran la micro central hidroeléctrica. La cual, está conformada principalmente por la bajada del sistema de cosecha de lluvia con la configuración definida (etapa 3), la manufactura, mediante impresión tridimensional, de los componentes seleccionados, tales como: las boquillas, las cazoletas, etc.; la instalación de la turbina y la construcción de la carcasa para proteger la turbina de agentes externos que afecten su rendimiento.

En la primera parte de esta etapa se realizó la instalación de la bajada (figura 6.30) del sistema de cosecha de lluvia de acuerdo con la configuración propuesta en la etapa 3 (Figura 6.3c) y que abastecerá de agua a la turbina. Debido a la presión generada por la carga hidráulica en condiciones máximas de operación ($H_T = 10.0\text{ m}$, $P = 98.10\text{ kPa}$), se determinó emplear tubería de PVC hidráulico Cédula 40 con el fin de garantizar la resistencia de los esfuerzos generados por el volumen de agua en la tubería mientras alcanza la altura mínima de operación ($H_T = 4.5\text{ m}$). Adicionalmente, como parte de la bajada, se imprimieron dos boquillas para el suministro de caudal a la turbina mediante impresión tridimensional (Figura 6.31) de acuerdo con las dimensiones previamente definidas para este elemento (Figura 6.4). La impresión de boquillas se realizó en un periodo de 22 horas (11 horas por cada boquilla) y con una densidad del 85%.

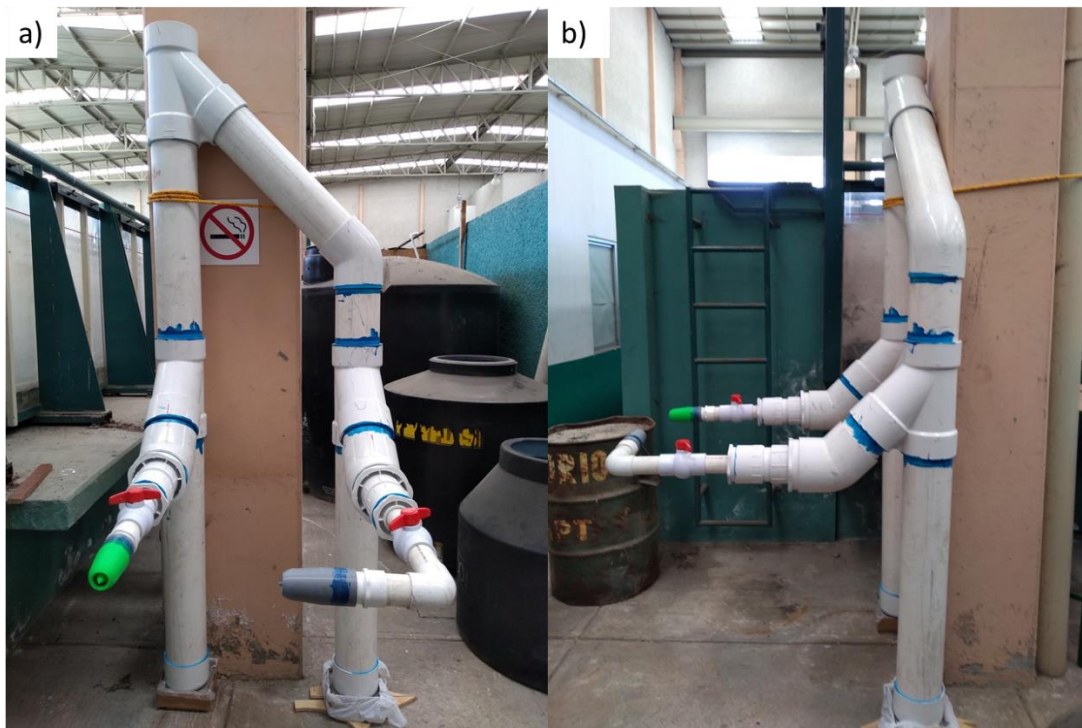


Figura 6.30. Bajada del sistema de cosecha de lluvia: a) Vista Frontal, b) Vista lateral

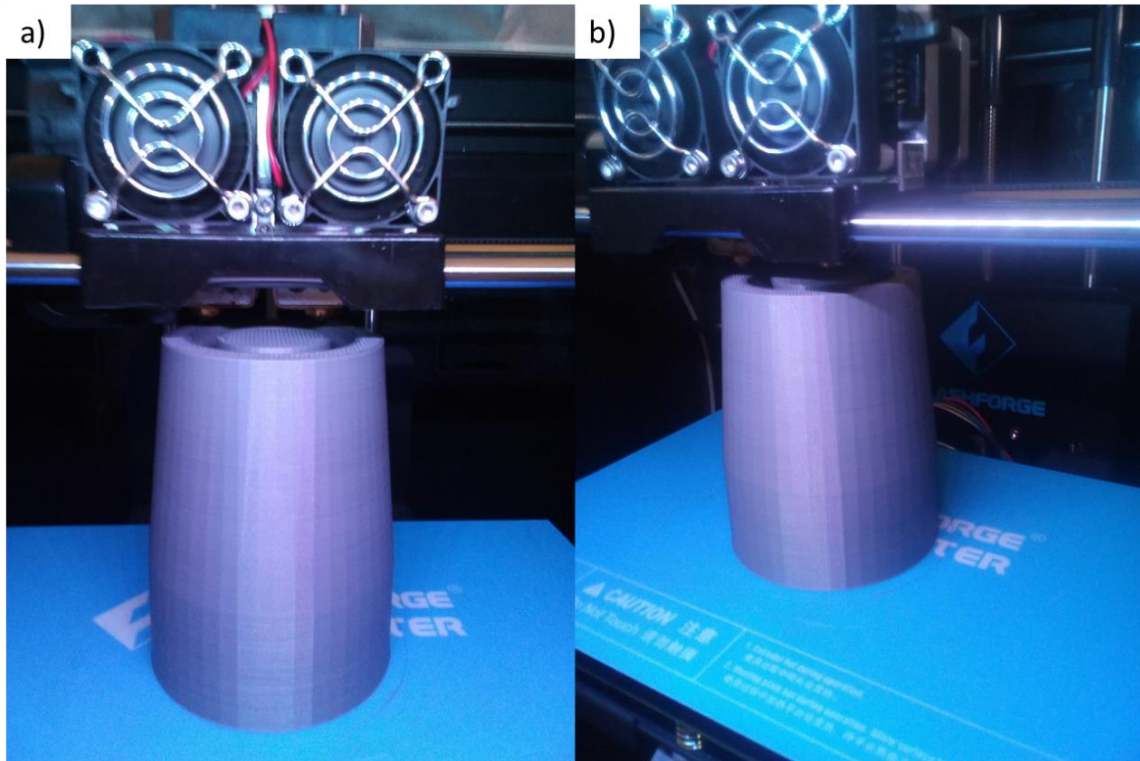


Figura 6.31. Manufactura de boquillas mediante impresión tridimensional

La segunda parte de la etapa consistió en la manufactura e instalación de la turbina de acuerdo con las características geométricas obtenidas del análisis de sensibilidad de la etapa 4. La manufactura de cazoletas se realizó mediante impresión tridimensional debido a su capacidad de generar geometrías complejas a diferencia de métodos de mecanizado convencionales (torno, fresadora, taladro, etc.). La impresión de las cazoletas se llevó a cabo en un periodo de tiempo de 169 horas (6 horas y media por cazoleta) con una densidad del 85%.

Una vez manufacturadas las cazoletas, se inició el armado de la turbina sujetando las 26 cazoletas al rodete mediante tornillos (Figura 6.32 y 6.33), asegurándose que la dirección en la salida del fluido coincida con el plano de las cazoletas. Finalmente, se construyó una carcasa para evitar que agentes ajenos al sistema afecten el funcionamiento de este y evitar salpicaduras alrededor del sistema, principalmente en el generador eléctrico.



Figura 6.32. Instalación de cazoletas en el rodete de la turbina.

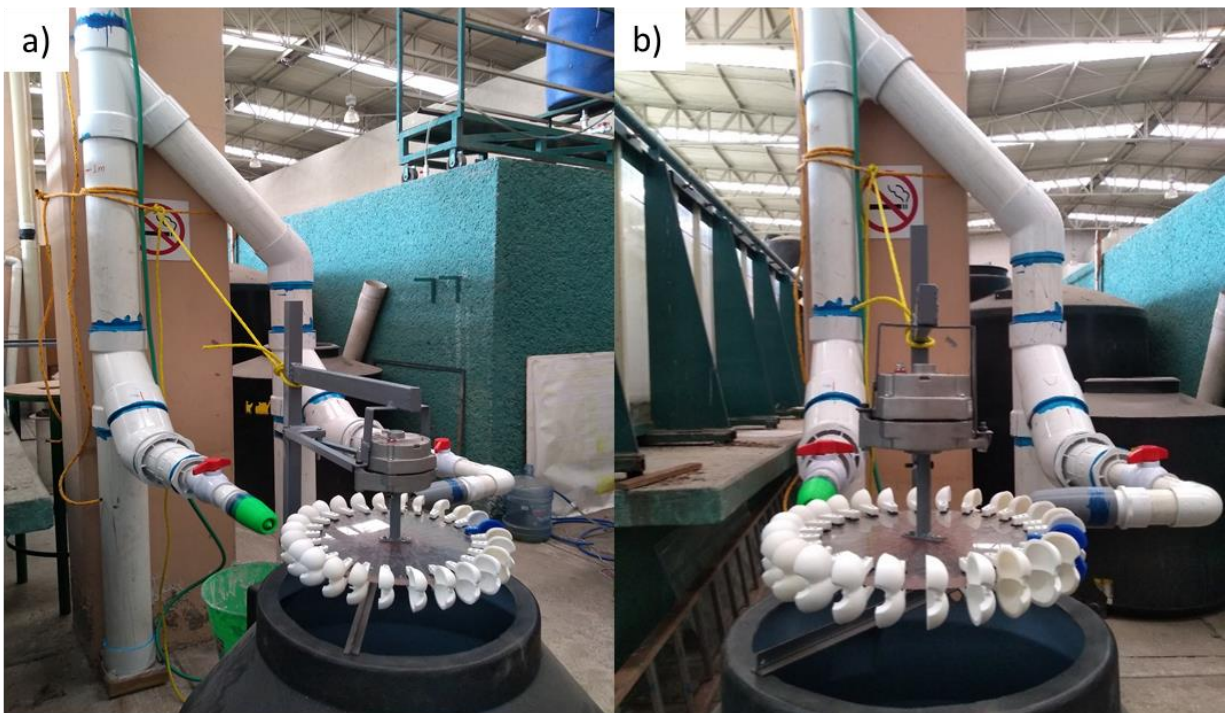


Figura 6.33. Instalación de la turbina y la bajada de lluvia: a) vista isométrica y b) frontal

6.6. Evaluación experimental del sistema

La evaluación experimental del sistema estima la cantidad de energía producida y la eficiencia alcanzada, tanto para la turbina como para el generador eléctrico, mediante una serie de pruebas bajo condiciones controladas (principalmente carga hidráulica). La lectura del número de revoluciones por minuto se realizó mediante un circuito electrónico y un sensor óptico. A partir de dichos valores registrados, y las relaciones obtenidas de las pruebas realizadas al generador para estimar voltaje V_{gen} y corriente eléctrica I_{gen} (Figuras 6.1 y 6.2), se pudo inferir valores tales como la velocidad tangencial de la turbina U [m/s] (ecuación 4.8), el torque generado \vec{T} [$N \cdot m$] (ecuación 4.7), el tiempo de descarga $t_{descarga}$, la altura de descarga en función del tiempo de descarga ΔZ [m], el caudal en función de la carga hidráulica H_{Ti} [m], la potencia teórica \dot{W}_{esp} [W], el trabajo absorbido por la turbina \dot{W}_{turb} , el voltaje generado V_{gen} , la corriente eléctrica I_{gen} , la eficiencia de la turbina η_{turb} y la eficiencia del generador η_{gen} .

Para la evaluación del sistema, se planteó la idea de suministrar agua al sistema mediante un sistema de bombeo para simular las condiciones de precipitación y el proceso de acumulación tubería hasta alcanzar diferentes valores de carga hidráulica y permitir la apertura de las compuertas. Mientras el circuito electrónico realizaba la lectura del número de revoluciones por segundo. Las primeras pruebas se realizaron con una carga inicial de tres metros con respecto a la boquilla hasta que el volumen acumulado se descargara completamente. El valor de carga es menor al planteado en el escenario mínimo. El propósito de esta prueba es analizar el comportamiento de la turbina operando con una o ambas boquillas abiertas, así como estimar la eficiencia de la turbina durante el tiempo de descarga. Los resultados de esta primera evaluación se pueden apreciar en la Tabla 6.19 y en el anexo 5.

Tabla 6.19. Resultados obtenidos del sistema operando a 3 metros de carga hidráulica

No de prueba	No de boquillas abiertas	Tiempo de descarga $t_{descarga}$ [s]	Energía teórica por descarga \dot{W}_{esp} [J]	Energía absorbida por la turbina \dot{W}_{esp} [J]	Eficiencia de la turbina η_{turb}
1	2	30	797.54	391.97	0.4914
2		30	797.49	405.59	0.5086
1	1	38	821.24	712.47	0.8675
2		38	821.25	677.87	0.8254

Es importante destacar que la turbina alcanzó una eficiencia máxima de 86% operando con una boquilla suministrando un caudal $Q_{sum} = 2.01 \text{ l/s}$ en el instante de apertura de la válvula. Por otro lado, operando con las dos boquillas se presentó una eficiencia menor (50%). El tiempo de operación fue mayor para las pruebas donde sólo se mantuvo abierta una boquilla alcanzando un tiempo de operación de hasta 38 s. Inicialmente, se planteó la idea de utilizar dos boquillas con el objetivo de garantizar un adecuado vaciado en la tubería y evitar el desbordamiento del agua en el sistema de cosecha de lluvia. Sin embargo, el tiempo que le toma al sistema descargar un volumen acumulado en tres metros de carga hidráulica es muy corto ($\leq 30 \text{ s}$). Por ello, se determinó que utilizar una boquilla es suficiente para suministrar el torque y caudal necesarios para que la turbina trabaje adecuadamente.

Por otra parte, se relacionó la cantidad de revoluciones por segundo registradas por que el circuito electrónico en función del tiempo en que el sistema se mantuvo activo (Figura 6.34). Se puede apreciar que, operando con dos boquillas, el número de revoluciones por segundo es menor durante la descarga debido a la rápida disminución de carga hidráulica, lo cual se traduce en menor energía potencial y a su vez en una velocidad menor en el chorro de salida (conversión a energía cinética). A su vez, a partir de los valores de revoluciones por segundo y carga hidráulica fue posible estimar la eficiencia hidráulica de la turbina (ecuación 4.13; Figura 6.35) en función de la energía teórica \dot{W}_{esp} y la absorbida en forma de trabajo en el rodete \dot{W}_{turb} . Se puede apreciar una diferencia marcada entre los resultados obtenidos según el número de boquillas trabajando. El sistema alcanza mayores valores de velocidad y eficiencia con una boquilla abierta, esto se debe a una menor disminución de carga en el tiempo. La línea punteada representa la línea de tendencia de acuerdo con la muestra.

Sobre la relación de eficiencia alcanzada por la turbina en función de la carga hidráulica se puede inferir que, la eficiencia se encuentra directamente relacionada con los valores de velocidad angular que pueda alcanzar la turbina. Una mayor velocidad angular ω_{turb} , e implícitamente velocidad tangencial U , es un indicador de mayor energía cinética en el chorro, menor presencia de fenómenos como cavitación (la cual se puede apreciar en las zonas donde el software estimó valores de presión negativos), pérdidas por fricción en las cazoletas o turbulencia.

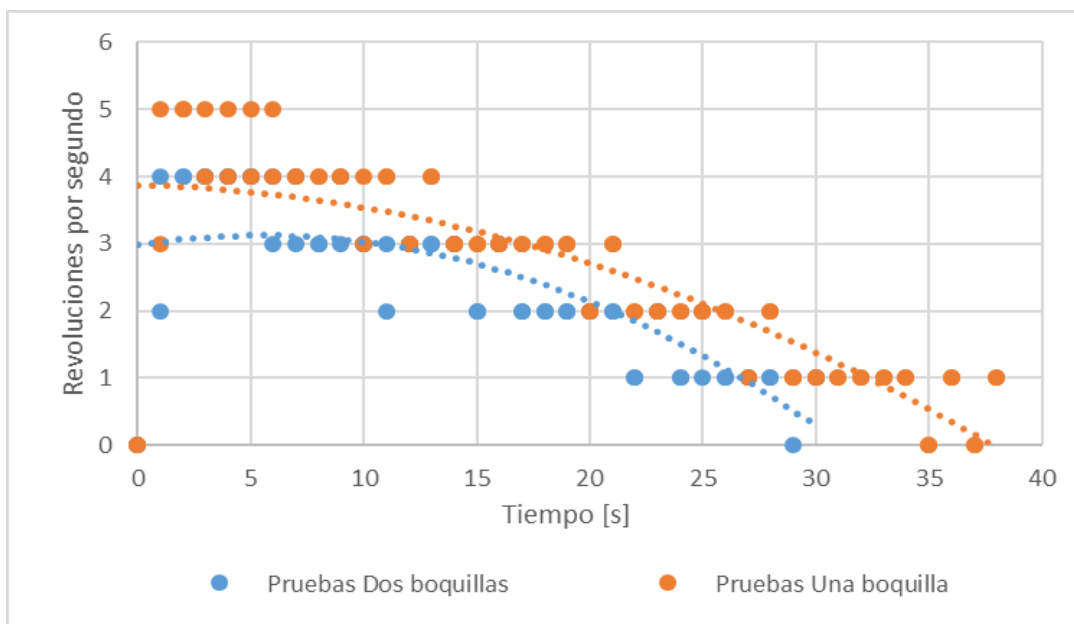


Figura 6.34. Correlación entre revoluciones por minuto y el tiempo de descarga a 3 metros de carga hidráulica

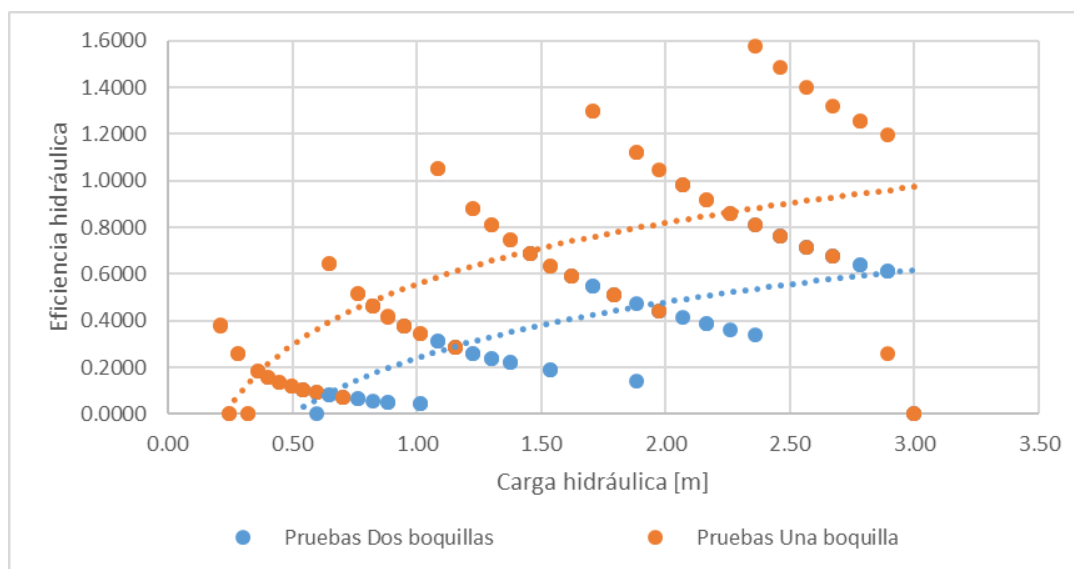


Figura 6.35. Correlación de la eficiencia de la turbina en función de la carga hidráulica

Posteriormente, la segunda etapa de experimentación consistió en someter el modelo a las condiciones de operación mínimas ($H_T = 4.5 \text{ m}$) y media ($H_T = 6.0 \text{ m}$), definidas en la etapa 3. De manera análoga a la evaluación anterior, a partir de los valores de revoluciones por segundo registrados por el circuito se realizó la estimación de diferentes parámetros de operación. La estimación de eficiencia hidráulica de la turbina por descarga se muestra en las Tablas 6.20 y 6.21 y en el anexo 5. Se puede apreciar que operando a 4.5 m de carga la eficiencia alcanzó un valor máximo del 81.13% (a excepción del valor registrado en la primera prueba) y un valor medio de 72.72%. En cambio, para una carga de 6.0 m se obtuvo un valor

máximo 79.05% y un valor medio de 78.39%. La similitud de resultados en las pruebas realizadas permite determinar que el sistema se comporta de manera estable durante la descarga bajo diferentes condiciones de trabajo. Esto se debe a la capacidad de la turbina tipo Pelton a ser menos susceptible a variaciones de presión y velocidad en el flujo a comparación de turbinas como Kaplan o Francis.

Tabla 6.20. Estimación de eficiencia hidráulica de la turbina por descarga en el escenario mínimo de operación

No de prueba	Carga hidráulica H_T [m]	Tiempo de descarga $t_{descarga}$ [s]	Energía teórica por descarga \dot{W}_{esp} [J]	Energía absorbida por la turbina \dot{W}_{turb} [J]	Eficiencia de la turbina η_{turb} [%]
1	4.5	40	1 816.56	875.84	48.21
2	4.5	44	1 830.16	1 420.41	77.61
3	4.5	46	1 836.76	1 421.55	77.39
4	4.5	44	1 830.16	1 312.07	71.69
5	4.5	46	1 836.76	1 490.18	81.13
6	4.5	45	1 833.72	1 472.60	80.30
Promedio		44.16	1 830.68	1 332.10	72.72

Tabla 6.21. Estimación de eficiencia hidráulica de la turbina por descarga en el escenario medio de operación

No de prueba	Carga hidráulica H_T [m]	Tiempo de descarga $t_{descarga}$ [s]	Energía teórica por descarga \dot{W}_{esp} [J]	Energía absorbida por la turbina \dot{W}_{turb} [J]	Eficiencia de la turbina η_{turb} [%]
1	6.0	52	3 249.84	2 564.57	78.91
2	6.0	51	3 244.35	2 564.57	79.05
3	6.0	46	3 254.65	2 513.51	77.23
Promedio		49.66	3 249.61	2 547.55	78.39

Los registros obtenidos de las pruebas muestran un tiempo de operación promedio de 44.16 segundos con una carga de 4.5 metros y 49.66 segundos para 6.0 metros. Durante estos periodos de tiempo, el número de revoluciones por segundo tiende a ir disminuyendo conforme el nivel del agua baja en la tubería (Figura 6.36 y 6.37). La rápida descarga está asociada al diámetro de chorro en la salida de la boquilla y el valor del caudal que es suministrado por esta. Por otro lado, conocidos el valor de velocidad a la salida del chorro fue posible estimar la altura descargada en la tubería ΔZ durante el periodo

$t_{descarga\ i}$ de operación del sistema (Figura 6.38 y 6.39). Donde, a partir de los segundos 40 y 48 (escenario mínimo y medio, respectivamente) la carga hidráulica es igual o menor a 0.5 m. Esta observación es importante, ya que indica que al alcanzar 0.5 m de altura en la columna de agua es viable cerrar las boquillas para conservar el volumen de agua restante y maximizar su utilidad pensando que a valores menores la turbina es inoperante. Sin embargo, esta conjetura aún se debe evaluar en función de la producción de energía a la salida del generador.

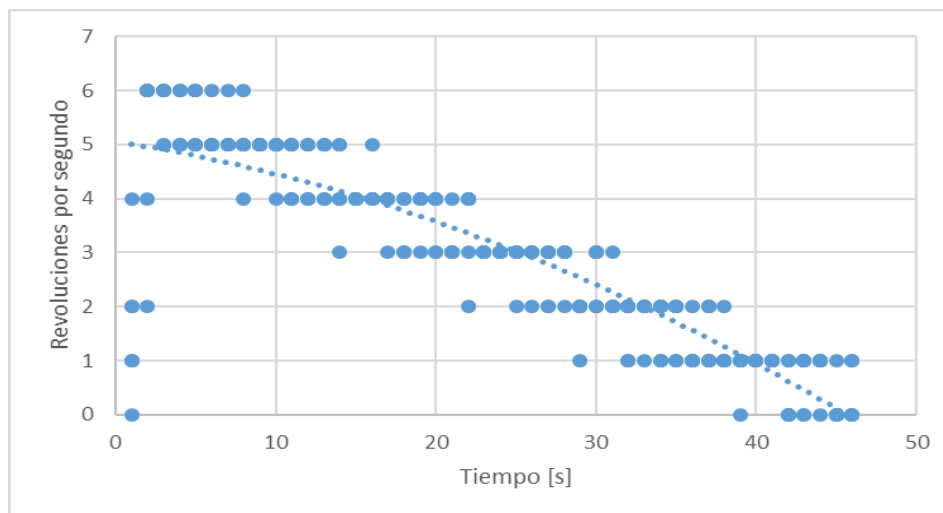


Figura 6.36. Correlación entre revoluciones por minuto y el tiempo de descarga en el escenario mínimo de operación

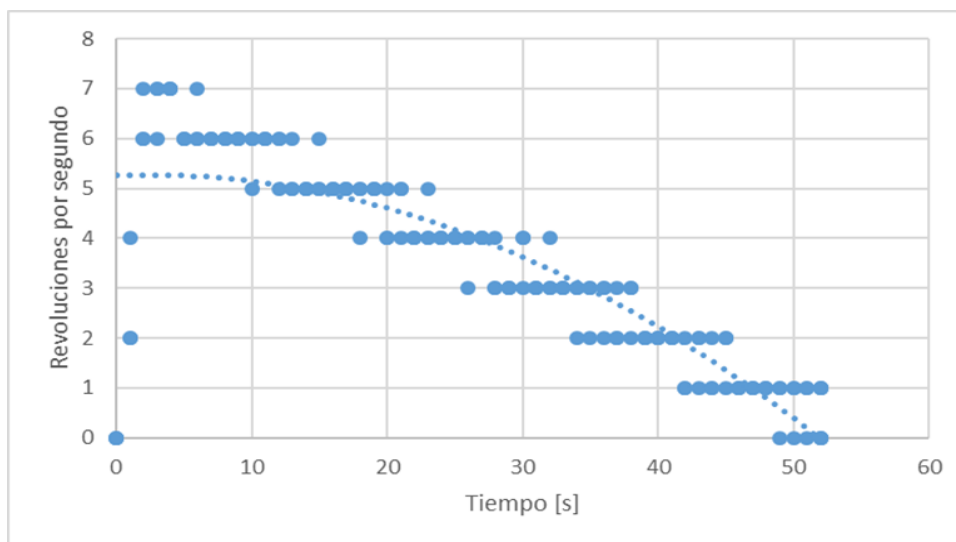


Figura 6.37. Correlación entre revoluciones por minuto y el tiempo de descarga en el escenario medio de operación

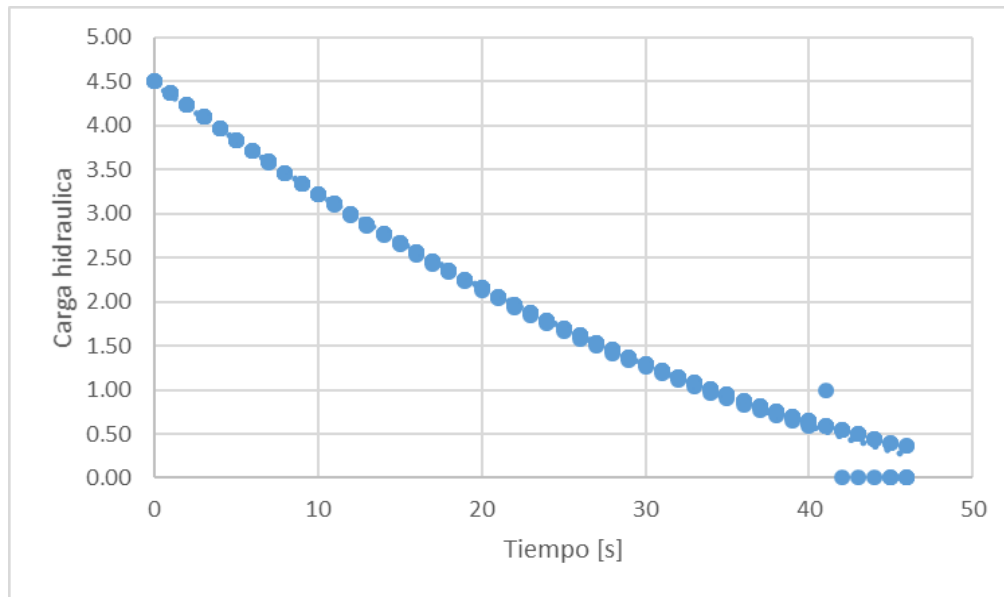


Figura 6.38. Correlación de la carga hidráulica durante el proceso de descarga a lo largo del tiempo para el escenario mínimo

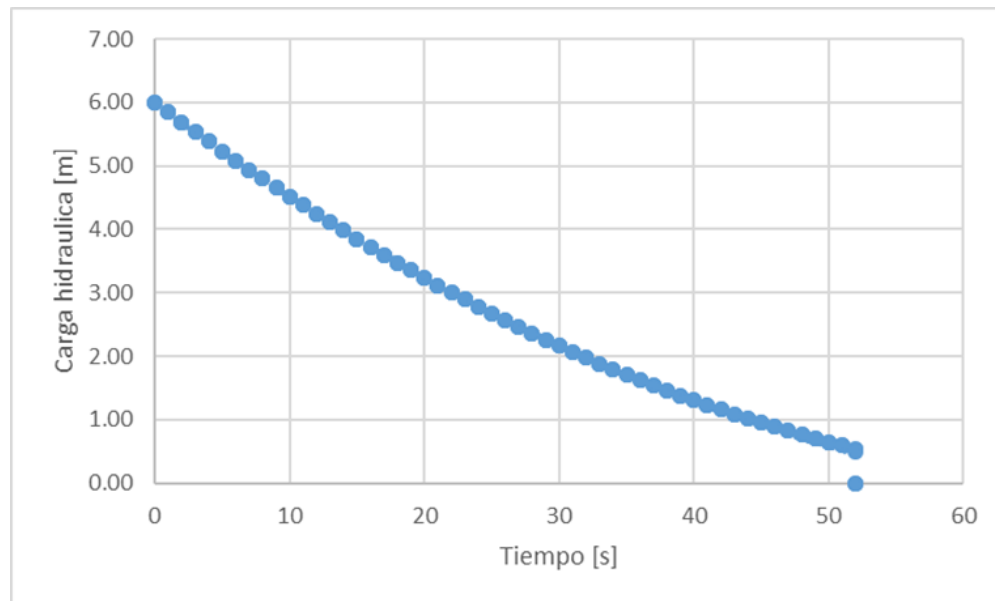


Figura 6.39. Correlación de la carga hidráulica durante el proceso de descarga a lo largo del tiempo para el escenario medio

Adicionalmente, se asoció la eficiencia hidráulica del sistema en función de la carga hidráulica (Figura 6.40 y 6.41). Se puede observar que en algunos puntos la eficiencia obtenida es mayor a 1. Esto se debe a que en la turbina Pelton la entrada del chorro de agua mantiene la inercia del torque suministrado por un periodo de tiempo mayor con respecto al valor de trabajo estimado en el instante $t_{descarga\ i}$. Por lo que,

la energía producida puede diferir con el valor teórico estimado. Por otro lado, la tendencia indica un valor máximo de 85% para el escenario mínimo y 90% para el escenario medio.

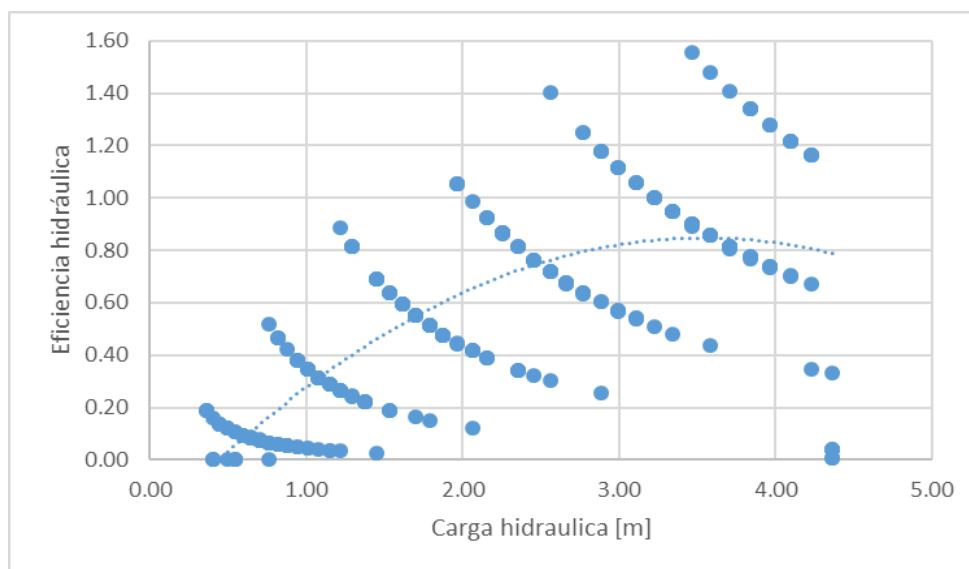


Figura 6.40. Correlación de la eficiencia hidráulica de la turbina en función de la carga hidráulica en el escenario mínimo de operación

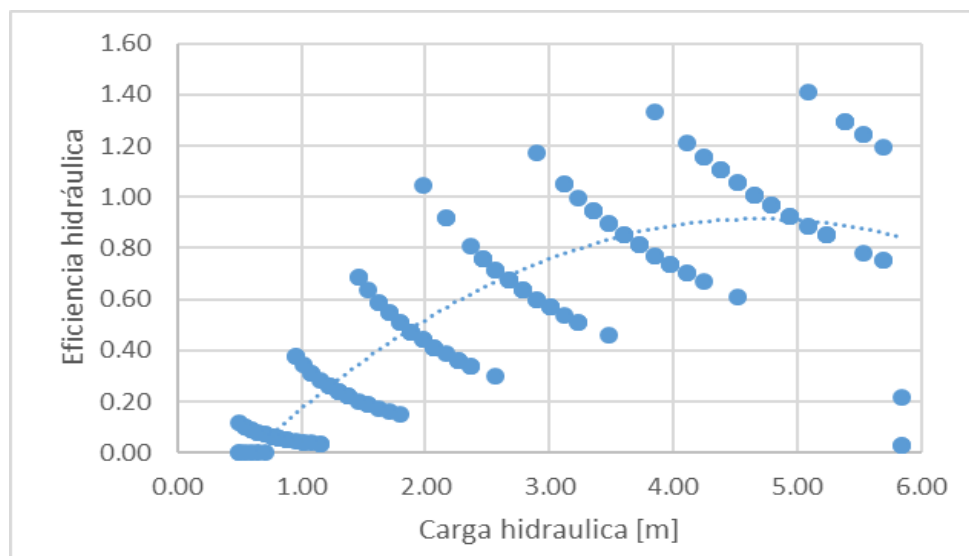


Figura 6.41. Correlación de la eficiencia hidráulica de la turbina en función de la carga hidráulica en el escenario medio de operación

Respecto a la generación de energía eléctrica, se estimó el voltaje y la corriente eléctrica producidas de acuerdo con las relaciones empíricas obtenidas de las pruebas experimentales realizadas al generador eléctrico (Figura 6.1 y 6.2). La estimación de energía y de eficiencia del generador para los escenarios mínimo y medio se muestran en las Tablas 6.22 y 6.23 y en el anexo 5. Para el escenario mínimo se alcanzó

una generación máxima de 712.76 J y un valor medio de 614.71 J. Por otro lado, para el escenario medio se obtuvo un valor máximo de 1 428.00 J y un valor medio de 1 408.51 J. La eficiencia alcanzada en ambos marcos de pruebas indica que el escenario medio de operación tiene una menor tasa de producción a pesar de una mayor eficiencia hidráulica. Esto se debe al valor de velocidad a la salida del chorro \bar{V}_{jet} y mayor velocidad tangencial U en la turbina, el cuál es mayor en el segundo escenario. Las Figuras 6.42 y 6.43 muestran la potencia a la salida del generador \dot{W}_{gen} en función de la carga hidráulica H_T . Es importante destacar que, en ambos casos, cuando el nivel de la columna de agua desciende hasta 3 metros la producción de energía es mínima (≤ 20 W). Por lo cual, es conveniente cerrar las compuertas para no desaprovechar la mitad del volumen de agua captada y volver a iniciar el proceso de acumulación en el sistema de conducción.

Tabla 6.22 Estimación de eficiencia del generador por descarga para el escenario mínimo de operación

No de prueba	Carga hidráulica H_T [m]	Energía absorbida por la turbina \dot{W}_{turb} [J]	Energía eléctrica producida \dot{W}_{gen} [J]	Eficiencia del generador η_{gen}
1	4.5	875.84	351.11	0.4009
2	4.5	1 420.41	651.51	0.4587
3	4.5	1 421.55	651.51	0.4583
4	4.5	1 312.63	629.18	0.4793
5	4.5	1 490.18	712.76	0.4783
6	4.5	1 472.60	692.19	0.4701
Promedio		1 332.20	614.71	0.4576

Tabla 6.23. Estimación de eficiencia del generador por descarga para el escenario medio de operación

No de prueba	Carga hidráulica H_T [m]	Energía absorbida por la turbina \dot{W}_{turb} [J]	Energía eléctrica producida \dot{W}_{gen} [J]	Eficiencia del generador η_{gen}
1	6.0	2 564.57	1 428.00	0.5568
2	6.0	2 564.57	1 410.22	0.5499
3	6.0	2 513.51	1 387.32	0.5519
Promedio		2 547.55	1 408.51	0.5528

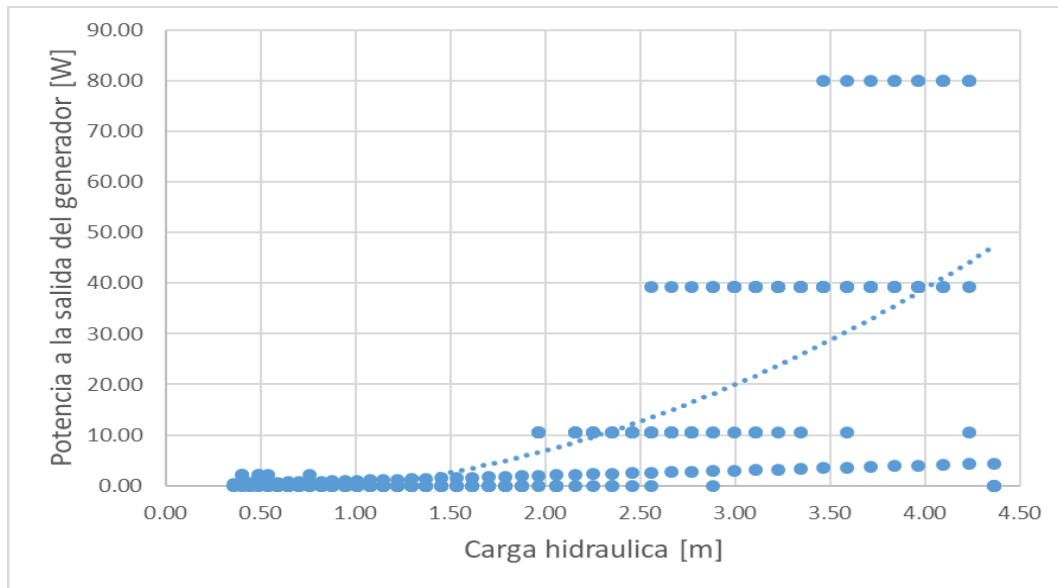


Figura 6.42. Correlación de generación de energía en función de la carga hidráulica en el escenario mínimo de operación

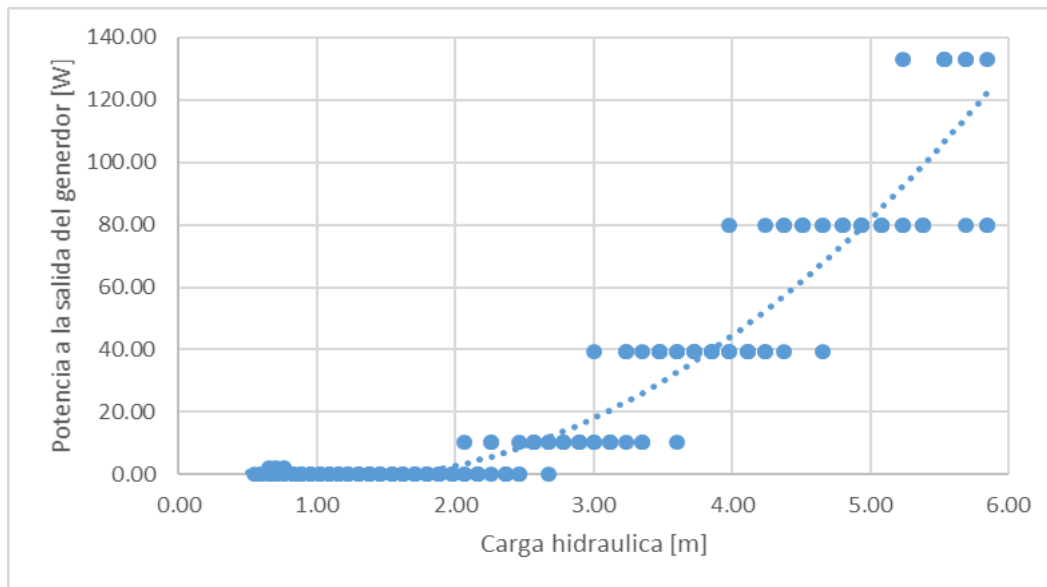


Figura 6.43. Correlación de generación de energía en función de la carga hidráulica en el escenario medio de operación

Analizando los resultados de ambos escenarios de trabajo, se puede comparar el desempeño de algunos parámetros, tales como el número de revoluciones por segundo y la potencia de salida en el generador (Figuras 6.44 y 6.45). Para el primer caso, se muestra un mayor valor de revoluciones por segundo para el escenario con una carga de 6 metros. Lo cual, puede estar asociada al fenómeno de inercia mencionado previamente debido al tipo de turbina empleada. Por otro lado, la potencia a la salida del generador muestra que a 3.0 metros de carga hidráulica, el valor de energía esperada se duplica. Es decir, mientras

que en el escenario mínimo $H_T = 4.5 \text{ m}$ la cantidad máxima de potencia alcanza un valor de 70 W y con un incremento de 1.5 metros produce un incremento notable en la generación de energía. Lo cual explica el incremento de eficiencia del generador en el escenario medio.

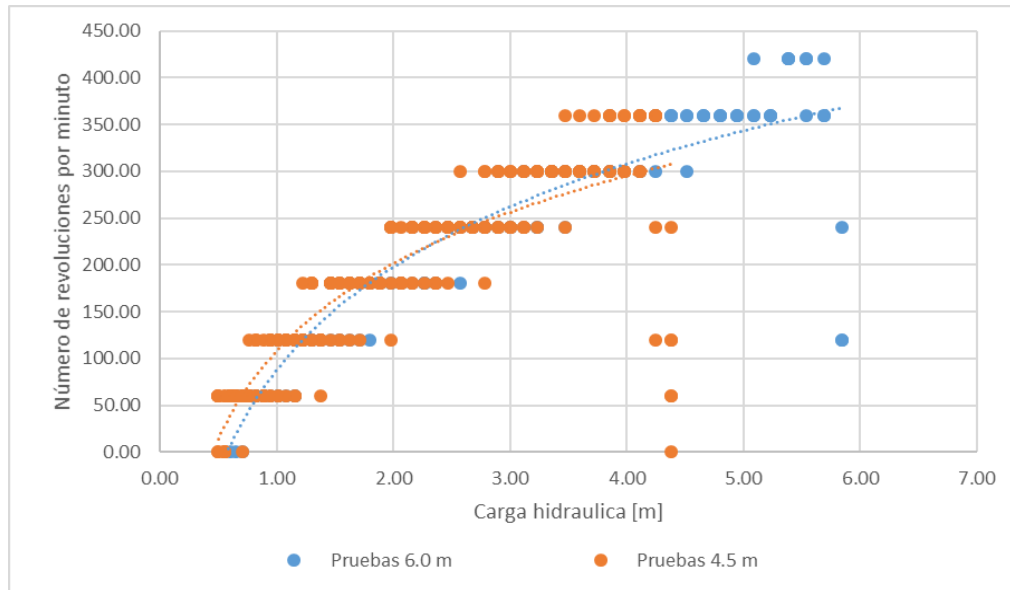


Figura 6.44. Correlación del número de revoluciones por minuto en de acuerdo con la carga hidráulica para los escenarios mínimo y medio

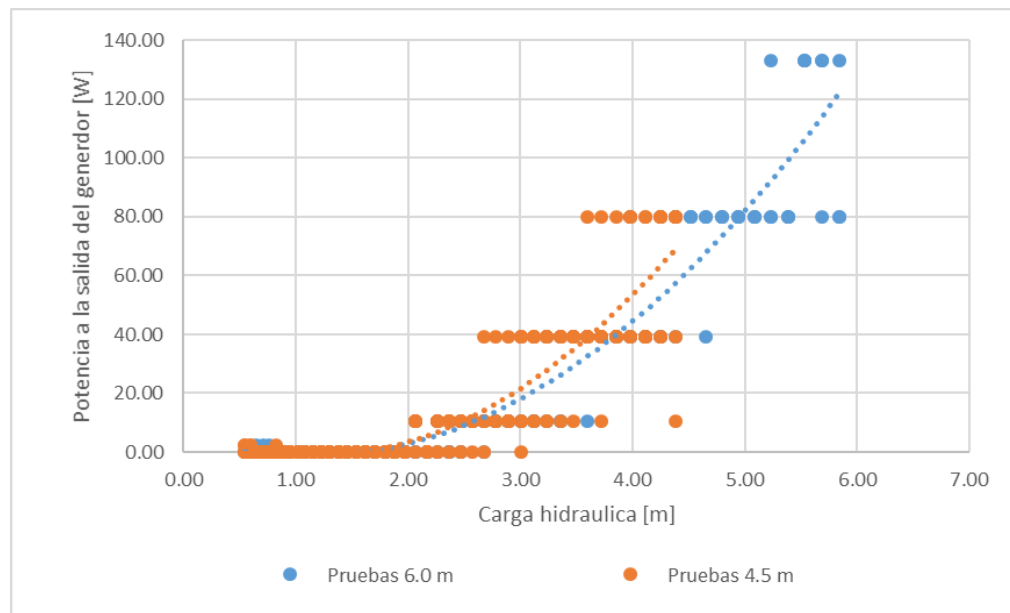


Figura 6.45. Correlación de la potencia de salida del generador de acuerdo con la carga hidráulica para el escenario mínimo y medio

Considerando los resultados obtenidos del comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios, es conveniente evitar que el volumen de agua acumulado en el sistema de conducción sea descargado completamente cuando las boquillas son abiertas hasta una altura no menor a $H_T = 3.0 \text{ m}$. La razón de esta modificación en el sistema de almacenamiento se debe a que a partir de valores igual o menores de dicha carga la producción de energía es igual o menor a 20 W . Por ello es conveniente cerrar el paso del fluido y permitir nuevamente el proceso de acumulación. La Tabla 6.24 muestra la cantidad de energía generada por el sistema para los escenarios de operación medio y mínimo funcionando hasta descargar a una altura de 3.0 m . Bajo las condiciones de escenario mínimo, la producción media de energía por descarga se estimó en 525.95 J en comparación con el escenario medio donde la cantidad de energía producida fue de $1\,350.29 \text{ J}$. La diferencia de 1.5 m en la carga aumentó casi tres veces la cantidad de energía a la salida del generador. Por ello, es conveniente aumentar el valor inicial de altura al que deberían ser abiertas las válvulas hasta 6 m .

Tabla 6.24. Estimación de energía generada descargando hasta $H_T = 3.0 \text{ m}$

Carga hidráulica $H_{Ti} \text{ [m]}$	$H_T = 6.0 \text{ m}$			$H_T = 4.5 \text{ m}$					
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.84	80.02	133.10	80.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.69	133.10	80.02	133.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.53	133.10	133.10	133.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.38	80.02	80.02	80.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.23	80.02	133.10	80.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.09	80.02	80.02	80.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.94	80.02	80.02	80.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.80	80.02	80.02	80.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.66	80.02	39.34	80.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.52	80.02	80.02	80.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.38	80.02	80.02	39.34	39.34	80.02	10.50	80.02	80.02	80.02
4.24	39.34	39.34	80.02	39.34	80.02	80.02	80.02	80.02	39.34
4.11	39.34	39.34	39.34	39.34	39.34	80.02	39.34	39.34	80.02
3.98	80.02	39.34	39.34	39.34	80.02	39.34	39.34	80.02	80.02
3.85	39.34	39.34	39.34	39.34	39.34	80.02	39.34	39.34	39.34
3.72	39.34	39.34	39.34	10.50	39.34	39.34	39.34	80.02	39.34
3.60	10.50	39.34	39.34	39.34	39.34	39.34	39.34	39.34	80.02
3.48	39.34	39.34	39.34	10.50	39.34	39.34	39.34	39.34	39.34
3.36	39.34	20.50	10.50	10.50	39.34	39.34	39.34	39.34	39.34
3.24	10.50	39.34	39.34	39.34	39.34	39.34	39.34	10.50	10.50
3.12	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	39.34	39.34	39.34	39.34
3.01	39.34	10.50	10.50	0.00	39.34	10.50	10.50	39.34	39.34
Suma	1373.28	1345.00	1332.60	317.39	565.29	536.45	524.61	605.97	605.97
Promedio	1350.29 J			525.95 J					

6.7. Análisis por Retorno Social de Inversión (SROI)

En el análisis SROI se realizó una evaluación de los beneficios obtenidos de la instalación de la micro central hidroeléctrica en una construcción de tipo industrial. Principalmente se evaluaron la cantidad de energía producida y el uso que se le puede aplicar en la planta de Dana de México. De manera adicional, fue estimada la disminución en el impacto ambiental por la emisión de dióxido de carbono (CO_2) en la generación de energía eléctrica.

Para cuantificar el beneficio energético se consideró como base, la producción de energía asociada con la lámina media diaria en junio (5.15 mm). Esto representa una potencia de 133.1 W con una carga hidráulica ($H_T = 6.0 \text{ m}$) y un gasto de 5.98 L/s por un periodo de 20 minutos. De esta manera, la variación de la producción de energía en los meses restantes es una función del número de eventos equivalentes (tabla 6.25). La cantidad de energía producida por evento se estimó en $159\,600 \frac{\text{J}}{\text{evento}}$.

Por otro lado, considerando que una lámpara LED ocupada para iluminar el estacionamiento tiene una potencia 100 W, se puede inferir que requiere un consumo de $6\,000 \frac{\text{J}}{\text{min}}$. Por lo que, la energía producida por evento por una micro central hidroeléctrica es capaz mantener encendida la lámpara por un periodo $t_{\text{lamp}} = 26.6 \text{ min}$.

Tabla 6.25. Número de eventos diarios esperados

Mes	Escenario mínimo	Escenario medio	Escenario máximo
Mayo	NA	0.40	0.88
Junio	0.16	1.00	1.84
Julio	0.42	1.11	1.79
Agosto	0.38	1.09	1.80
Septiembre	0.20	0.98	1.75
Octubre	NA	0.42	0.95

NA: No aplica

Ya que cada evento puede producir la energía suficiente para mantener encendida una lampara por un lapso de 26.6 min se puede inferir la cantidad de minutos de iluminación para cada mes. La figura 6.46 muestra la cantidad de minutos al mes que es posible mantener encendida una lámpara para los diferentes escenarios de precipitación esperados. Se puede observar que para un escenario medio durante el mes de julio se alcanza un tiempo aproximado de 900 min (15 hrs). Mientras que durante el mes de junio se alcanza un tiempo máximo de 1 500 min (25 hrs) para el escenario más húmedo. Lo valores mostrados en la figura 6.46 son producidos por una sola micro central hidroeléctrica.

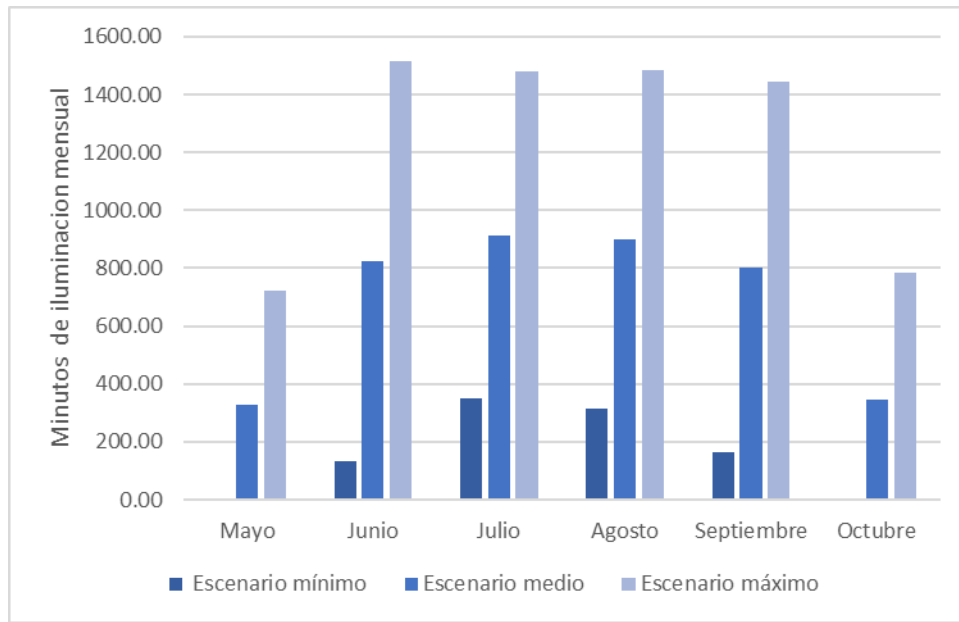


Figura 6.46. Minutos posibles de iluminación en función de la energía producida mensualmente por la micro central hidroeléctrica

La estimación de energía según las condiciones de precipitación se realizó bajo la suposición de que el sistema trabaja a una carga hidráulica constante $H_T = 6.0 \text{ m}$. Sin embargo, debido a que el caudal de ingreso por precipitación es mayor al descargado por la boquilla, el valor de la carga hidráulica H_T tiende a aumentar y por consecuencia también la cantidad de energía generada (figura 6.47). La figura 6.48 muestra la potencia teórica y la esperada a la salida del generador de acuerdo con el incremento de carga y caudal mencionados.

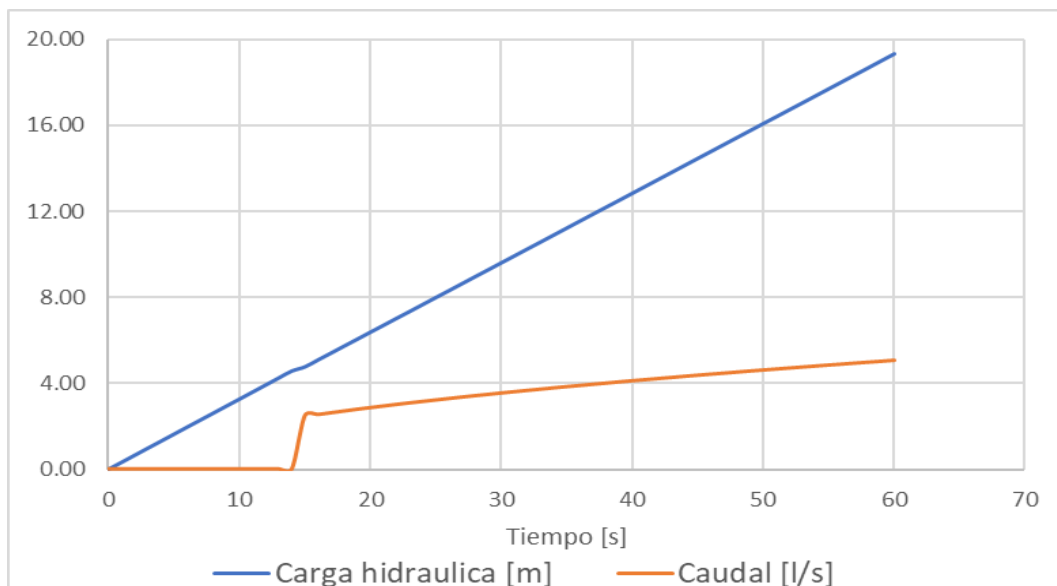


Figura 6.47. Tendencia de incremento de la carga hidráulica y el caudal en la micro central hidroeléctrica bajo condiciones medias de operación

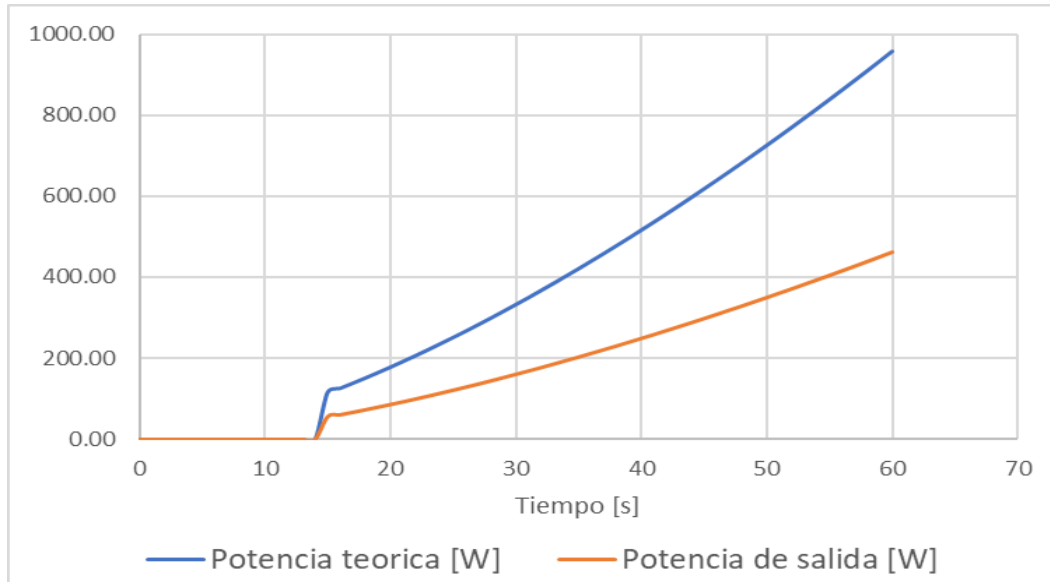


Figura 6.48. Tendencia de incremento de la producción de energía teórica y la esperada a la salida del generador

Se puede observar que el incremento en los valores de carga hidráulica y de caudal propician un aumento considerable en la producción de energía a la salida del generador. Por ejemplo, a los 40 segundos de operación se alcanza una carga hidráulica de 12 m y una producción de 230 W. Por lo que dos micro centrales hidroeléctricas operando bajo estas condiciones son capaces de abastecer el consumo de alumbrado en el estacionamiento de la nave industrial (400 W).

Por otra parte, se mencionó que 1 kWh de energía producida equivale a 0.94 kg de dióxido de carbono. Lo cual, permite estimar el impacto ecológico del sistema 26 kg de CO₂ no emitido a la atmósfera por la implementación de la micro central hidroeléctrica bajo condiciones medias de precipitación para el periodo Mayo-Octubre. En condiciones máximas de precipitación, la reducción de emisión de CO₂ alcanzaría un aproximado de 108.1 kg. Considerando la instalación de 16 micro centrales (una por cada bajada en la nave industrial), la reducción de CO₂ sería de aproximadamente 0.416 Ton y 1.73 Ton por año para condiciones medias y máximas de precipitación, respectivamente.

Una alternativa para reducir el costo de instalación y aumentar la producción de energía es incrementar el valor de área de captación y reducir el número de micro centrales. Por ejemplo, para cada micro central hidroeléctrica se consideraría el doble de área tributaria para aumentar el volumen de descarga y el valor de caudal suministrado Q_{sum} en cada micro central. La producción de energía en condiciones medias de

precipitación alcanzaría un aproximado de 620.51 W a una carga hidráulica de $H_T = 12 \text{ m.}$ y un caudal de $Q_{sum} = 8.03 \text{ l/s.}$ Siendo una micro central capaz de alimentar el alumbrado del estacionamiento por si sola.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proceso de evaluación realizado en este proyecto de investigación, cumpliendo con el objetivo general y la hipótesis planteada, permitió optimizar el dimensionamiento geométrico de una turbina y aumentar la eficiencia de una micro central hidroeléctrica que opera a partir de un sistema de cosecha de lluvia hasta en un 81.13% por medio de la evaluación en función de sus parámetros geométricos mediante el uso de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y, posteriormente, de la experimentación de prototipos seleccionados.

En relación con los objetivos específicos planteados, el primero, la *Comparación de producción de diversos generadores según el torque de operación*, permitió seleccionar un generador que transformase la energía mecánica de la turbina en eléctrica. La comparación de generadores disponibles en mercado se realizó considerando la cantidad de energía capaces de producir, su aplicación en sistemas energéticos de baja escala, entre otros. Los criterios de selección del generador fueron, principalmente, operar a valores bajos de torque y de revoluciones por minuto. Estos datos proporcionaron condiciones de entrada para el diseño de la turbina, influyendo principalmente en su diámetro para aprovechar el flujo de agua proveniente del sistema de cosecha de lluvia. Por ello, fue utilizado un generador empleado usualmente en turbinas eólicas y micro centrales hidroeléctricas para pequeños cauces naturales marca SKY-MAX modelo 'PMA_BASIC_12V_DC' con un rango de operación de entre 20W a 800 W dependiendo del número de revoluciones que alcance por minuto.

En la *Definición de parámetros hidráulicos y condiciones de entrada*, se abordó la estimación de los volúmenes de captación y de descarga y la configuración de la bajada del sistema de cosecha de lluvia. El análisis estadístico permitió apreciar que la temporada con mayor disponibilidad de agua para la micro central comprende en el periodo Mayo-Octubre. Específicamente, los meses de junio, julio y agosto presentaron una mayor lámina de precipitación y un tiempo de descarga largo, mientras que mayo, septiembre y octubre podrán permitir la operación de la micro central incluso con bajas láminas de precipitación diaria, aunque por un periodo de tiempo menor. A partir de los datos de volumen y tiempo de descarga, el análisis de factibilidad de la bajada, en función del número de boquillas y caudal suministrado, permitió definir, entre 3 opciones, la mejor configuración geométrica de bajada en el sistema de cosecha de lluvia. La cual, consistió en una bajada con dos boquillas operando a una misma altura ($H_T = 4.5\text{ m}$) de columna de agua para asegurar el desahogo adecuado y conservar suficiente energía potencial para mantener en funcionamiento la turbina.

La *Definición del árbol de experimentos e indicadores de rendimiento* permitió definir los parámetros y la variación de las dimensiones de estos a evaluar mediante CFD para la optimización geométrica de la turbina en función de los indicadores de rendimiento establecidos en el árbol de experimentos. De esta etapa, se puede destacar que los indicadores de rendimiento fueron definidos en función de la relación k entre los valores de velocidad a la entrada y la salida de la turbina. Los cuales, se puede considerar como un aporte importante de la metodología para seleccionar la geometría óptima de turbina.

A partir de valores de diseño geométrico, este trabajo se propuso la variación de las dimensiones geométricas proporcionadas por otros autores. La simulación numérica demostró una importante inferencia que generan diferentes valores en las dimensiones de la turbina y su impacto en los indicadores de eficiencia. Por ejemplo, el modelo de cazoleta 'Bucket_1.28 d_{jet} _2.79 d_{jet} ' (longitud de cazoleta 24.38 mm y altura de cazoleta 53.15 mm) mostró indicios de vorticidad entre la salida del fluido en la cazoleta a tal grado que el flujo se mezcla con el chorro de entrada (intercepción de los flujos). Por ello, se deben incrementar los valores de umbrales mínimos en la longitud de cazoleta L_{bucket} establecidos por otros autores.

Por otro lado, en función de los resultados obtenidos mediante simulación numérica se realizó el análisis de sensibilidad donde se determinó que el modelo de cazoleta 'Bucket_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} ' (longitud de cazoleta 34.67 mm y altura de cazoleta 43.43 mm) fue seleccionado como el modelo de óptimo para emplear en la turbina. El valor del indicador de rendimiento de dicha configuración fue de $k = 0.5643$. Además, se destaca que los valores altos de la relación L_{bucket} y A_{bucket} propiciaron una mayor velocidad de salida en la cazoleta reduciendo el valor de las pérdidas por fricción. De igual forma, el segundo modelo con mejor valor del indicador de rendimiento fue la configuración 'Bucket_1.55 d_{jet} _2.28 d_{jet} ' (longitud de cazoleta 29.52 mm y altura de cazoleta 43.43 mm), la cual muestra que el bajo valor en la altura de la cazoleta fomenta una menor cantidad de energía perdida comparado con su longitud. Las variaciones en las dimensiones geométricas de la cazoleta, aunque mínimas, demostraron ser significativas derivado de las pruebas de hipótesis realizadas para determinar la diferencia de medias en relación con el indicador de rendimiento.

Es importante destacar que, el análisis fluido-estructura fue de gran utilidad para conocer la deformación y el esfuerzo equivalente (Von Mises) a los cuales sería sometido el modelo de cazoleta bajo las diferentes condiciones de operación. El análisis mostró la necesidad de modificar el grosor de pared (5 mm) de la cazoleta para aumentar su resistencia y evitar una falla en la estructura de la turbina. Además, el análisis permitió definir la selección del material de manufactura considerando los materiales más comunes en

impresoras tridimensionales y sus propiedades mecánicas. Se optó por emplear PLA, sobre ABS, que es el polímero más común y fácil de trabajar.

La *evaluación experimental del sistema* mostró que la turbina se comporta de manera uniforme bajo diferentes condiciones de operación. La cantidad total de pruebas realizadas fue de 13, donde las principales variables que se consideraron para el análisis fueron el valor de carga hidráulica y el caudal a la salida de la boquilla. Es posible destacar que, una sola boquilla fue capaz de suministrar el caudal y torque necesarios para que la turbina sea capaz de generar energía eléctrica. Al emplear dos boquillas, como se planteó inicialmente, se encontró un valor de torque mayor, sin embargo, la velocidad se mantuvo constante, por lo que la eficiencia se redujo y el tiempo de operación disminuyó drásticamente. El torque generado por una boquilla sobrepasó el mínimo necesario. Por ello, se recomienda emplear un sistema de transmisión de potencia (engranes helicoidales preferentemente) con una relación 2:1 para aumentar el número de revoluciones y la producción de energía eléctrica. Respecto a la parte estructural, las pruebas experimentales permitieron evaluar el comportamiento de la estructura del sistema de cosecha de lluvia. Con una carga de 6 metros el sistema no presentó indicios de inestabilidad, vibración, deformación o fallas estructurales en las tuberías y conexiones del sistema. Por lo que, se puede asegurar que el sistema puede trabajar con un alto grado de seguridad.

La medición de energía eléctrica mostró una tendencia uniforme en los valores para cada una de las pruebas a las que el sistema fue sometido. El sistema fue probado con tres diferentes valores de carga hidráulica, de los cuales se observó una eficiencia de hasta 81.13%. Debido a que, en el escenario mínimo, la producción de energía eléctrica es muy pequeña para un carga hidráulica de 4.5 m, se recomienda aumentar el inicio de operación a un valor de carga hidráulica de 6 m. De esa manera la producción se duplica (130 W) a la salida del generador.

La producción de energía bajo condiciones reales de precipitación es esperada mayor a la estimada en los experimentos. Lo anterior debido a la rapidez en la acumulación de agua en el sistema de cosecha de lluvia dependiente de la intensidad de eventos. Sin embargo, los resultados vistos desde una perspectiva conservadora muestran que una micro central hidroeléctrica es capaz de proporcionar energía suficiente para el funcionamiento de una lámpara LED de 100 W hasta por 1 515 minutos al mes.

Finalmente, se ha mostrado que los beneficios de este sistema no sólo cubren el suministro de energía, sino que fomentan ambos: la disminución en las emisiones de gases invernadero y el aprovechamiento de agua al ser incluido en un sistema de captación de agua de lluvia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D ALCHEMY. (2018). Material Properties. Disponible en: <https://www.3d-alchemy.co.uk/3d-printing-material-properties.html#ABS>. [Fecha de consulta: 21 de Febrero de 2018].

Alnakhlani, M., Mukhtar, M, Himawanto, D., Alkurtehi, A. & Danardono D. (2015). Effect of the bucket and nozzle dimension on the performance of a Pelton water turbine. *Modern Applied Science*, 9 (1), 25-33.

ANSYS Engineering. (2018). Structural Analysis. Disponible en: www.ANSYS.com/products/structures. [Fecha de consulta: 27 Mayo de 2018].

Anugrah, P., Setiawan, A., Budiarto, R. & Sihana (2015). Evaluating micro hydro power generation system under climate change scenario in Bayang Catchment, Kabupaten Pesisir Selatan, West Sumatra. *Energy Procedia*, 65 (1), 257-263.

Archetti, R. (2011). Micro hydroelectric power: Feasibility of a domestic plant. *Procedia Engineering*, 21 (1), 8-15.

Atthanayake, I. (2009). Analytical Study of Flow Throught a Pelton Turbine Bucket Using Boundary Layer Theory. *International Journal of Engineering & Technology*, 9 (9), 11-15.

Bhargav, M., Ratna, V., Anbuudayanasankar, S. & Balaji, K. (2015). Power generation by high head water in a building using micro hydro turbine – a greener approach. *Pollution control technologies and alternative energy options*, doi: 10.1007/s11356-015-5317-6.

Beer, F., Johnston, E., DeWolf, J. & Mazurek, D. (2012). Mechanics of materials. 6° Edition, Mc Graw-Hill, United States, 758 p.

Berga, L. (2016). The role of hydropower in climate change mitigation and adaptation: A review. *Engineering*, 2 (1), 313-318.

Capacity Building for Integrated Water Resources Management (CAP-NET) (2009), *La GIRH como herramienta para la adaptación a los cambios climáticos*. Manual de capacitación y guía para los moderadores, Canadá, 140 p. <http://cap-net.org>.

Campisano, A. & Modica, C. (2012). Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resources, Conservation and Recycling*, 63 (1), 9-16.

Cheng, C., Liao, M. (2009). Regional rainfall level zoning for rainwater harvesting systems in northern Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, 53 (1), 421-428.

Chung, T. (2002). Computational Fluid Dynamics. 1° Edition, Cambridge University, United Kingdom, 1012 p.

Chongji, Z., Yexiang, X., Wei, X., Tao, W., Jin, Z, Zhengwei, W. y Yongyao, L. (2016). Numerical Analysis of Pelton nozzle jet flow behavior considering elbow pipe. *Earth and Enviromental Science*, 49 (1), 11-18.

Comisión Nacional del Agua (2016). Estadísticas del agua en México, Edición 2016. 1° Edición, SEMARNAT, México, 275 p.

Cooney, K. (2016). Legitimation dynamics: How SROI could mobilize resources for new constituencies. *Evaluation and Program Planning*, 1 (1), 1-6.

Díaz-Delgado, C., Fonseca, C.R., Esteller, M.V., Guerra-Cobián, V.H., Fall, C., 2014. The establishment of integrated water resources management based on emergy accounting, *Ecological Engineering* 63: 72-87. ISSN: 0925-8574.

Dixon, S. (2005). Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery. 5° Edition, Elsevier, United Kingdom, 381 p.

Einsering, M. (1991). Harnessing water power on a small scale. Micro Pelton turbines. Volume 9, MHPG Series, Switzerland, 756 p.

Ensys, S.A. de C.V. (2017). Sistemas fotovoltaicos. Disponible en: <http://ensys.mx/energia-solar/sistemas-fotovoltaicos.php>. [Fecha de consulta: 4 de Noviembre de 2017].

Esteller, M. & Díaz, C. (2000). Las aguas subterráneas de una Cuenca de altura: el Valle de Toluca, en: Antón, D. & Díaz, C. (eds), Sequía en un mundo de agua, 1° edición, CIRA-UAEM/Piriguazú Ediciones, Costa Rica/México, 420 p.

ETSAP (2010). Hydro Power. Disponible en: https://iea-etsap.org/E.../E06-hydropower-GS-gct_ADfina_gs.pdf. [Fecha de consulta: 10 de Junio de 2018].

Falco, G., Web, R. (2015). Water Microgrids: The future of water infrastructure resilience. *Procedia Engineering*, 118 (1), 50-57.

Fonseca, C. R. (2014). Sistemas de modelos termohidrológicos de evaluación de eficiencia y optimación en asignación en recursos hídricos (Tesis de doctorado). CIRA-UAEMex, México.

Fonseca, C., Hidalgo, V., Diaz-Delgado, C., Vilchis-Frances, A. & Gallego, I. (2017). Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns. *Journal of Cleaner Production*, 145 (1), 323-335.

Fox, R., McDonald, A., Pritchard, P. (2002). Introduction in Fluid Mechanics. John Wiley & Sons, EE. UU. 787 p.

Gelpke, V., Howell, A. (2017). Hydraulic turbines, their design and installation. 1° Edición, Facsimile Publisher, India, 293 p.

Hosseini, M., Saghaian, B. & Haghighi, F. (2013). Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. *Resources, conservation and recycling*, 73 (1), 86-93.

Hydro Power (2016). International Network for Sustainable Energy. Disponible en: <http://www.inforse.org/europe/dieret/Hydro/hydro.html#TOP>. [Fecha de consulta: 21 de Noviembre de 2017].

H. Ayuntamiento de Toluca. (2008). Reglamento de Imagen Urbana del Municipio de Toluca. Gaceta Especial Municipal. México, 29 p.

Ikeda, T., Lio, S., & Tatsuno, K. (2010). Performance-of-nanohydraulic-turbine utilizing-waterfalls. *Renewable Energy*, 35(1), 293-300.

Imteaz, M., Shanableh, A., Rahman, A. & Ahsan, A. (2011). Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 55 (1), 1022-1029.

INECC. (2012). Características generales de la zona metropolitana del Valle de Toluca. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/folletos/299/carac.html>. [Fecha de consulta: 20 de Septiembre de 2018].

Kengne, E., Hamandjoda, O & Nganhon, J. (2017). Methodology of feasibility studies of micro-hydro power plants in Cameroon: Case of the micro-hydro of Kemken. *Energy Procedia*, 119 (1), 17-28.

Kothandaraman, C.P. & Rudramoorthy, R. (2007). Fluid Mechanics and Machinery. 2° Edition, New Age International Publishers, India, 596 p.

- Li, Z., Boyle, F., & Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination*, 260, 1-8.
- López, B. (2015). Aplicación de CFD-ANSYS-FLUENT en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura (Tesis de Maestría). CIRA-UAEMex, México.
- Mataix, C. (2008). *Mecánica de fluidos y Maquinas hidráulicas*. 2° Edición, Alfaomega, Mexico, 660 p.
- Missouri Wind and Solar (2019). 7 Magnet 48 Volt AC Output Permanent Magnet Alternator for Wind Turbines. Disponible en: <http://mwands.com/store/48-volt-basic-pma?search=generator>. [Fecha de consulta: 29 de Enero de 2019].
- Mock, F. (1973). Land capability appraisal, Indonesia. water availability appraisal - basic study 1. Field Document of FAO, Land and Water, Development Div.
- Morabito, A. & Hendrick, P. (2019). Pump as turbine applied to micro energy storage and smart water grids: A case study. *Applied energy*, 241 (1), 567-579.
- Nasir, B. (2013). Design of high efficiency Pelton turbine for micro-hidropower plant. *International Journal of Electrical Engineering and Technology*, 4(1), 171-183.
- Nasir, B. (2014). Design considerations of micro-hydro-electric power plant. *Energy Procedia*, 50(1), 19-29.
- National Aeronautics and Space Administration (2018). Design packet. Disponible en: <https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/design-packet-ii.pdf>. [Fecha de consulta: 21 de Junio de 2019].
- National Aeronautics and Space Administration. (2015). CFD Analysis process. Disponible en: <https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/tutorial/process.html>. [Fecha de consulta: 3 de Noviembre de 2017].
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros*. 1° Edición, Ed. Mc Graw-Hill, México, 868 p.
- Nechleba, M. (1957). *Hydraulic turbines: Their design and Equipment*. 1° Edition, Constable & Co Ltd, United Kingdom, 636 p.
- Norton, R. (2011). *Diseño de máquinas: Un enfoque integrado*. 4° Edición, Pearson Educación, México, 888 p.

Organización Panamericana de la Salud. (2004). Guía de diseño para captación del agua de lluvia. Organización Mundial de la Salud, Perú, 15 p.

Potter, M. Wiggert, D. (2002). Turbomáquinaria. En Mecánica de Fluidos. 3ª Edición, Ed. Thomson, México, 769 p.

Rai, A., Kumar, A. y Staubli, T. (2016). Forces acting on particles in a Pelton bucket and similarity considerations for erosion. *Earth and Environmental Science*, 49 (1), 1-10.

Sample, D., Liu, J. (2014). Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and run off capture. *Journal of Cleaner Production*. 75 (1), 174-194.

Santoli, L., Berghi, S. y Bruschi, D. (2015). A schematic framework to assess mini hydro potentials in the Italian Regional Energy and Environmental Plans. *Energy Procedia*, 82 (1), 615-622.

Secretaría de Energía. (2016). Contexto Energético Mundial, en: Secretaría de Energía, Balance Nacional de Energía 2015. Secretaria de Energía, 1ª Edición, México, 136 p.

SEMARNAT (2016). Lineamientos técnicos: Sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda. Comisión Nacional del Agua, 1ª Edición, México, 42 p.

SolidWorks Corporation. (2019). Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks. SolidWorks Corporation, EE. UU, 250 p.

Sotelo, G. (2002). Hidráulica General. Volumen 1. Ed. Limusa, México, 561 p.

Souari, L., Hassairi, M. (2013). Numerical simulation of the flow into a rotating Pelton bucket. 3 (2), 67-74.

Stec, A., Kordana, S., Slys, D. (2017). Analyzing the financial efficiency of use of water and energy saving systems in single-family homes. *Journal of Cleaner Production*, 151 (1), 193-205.

Su, M., Lin, C., Chang, L., Kang, J. & Lin, M. (2009). A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design and evaluation. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1), 393-399.

Teknosolar (2019). Baterías para sistemas fotovoltaicos. Disponible en: <https://www.teknosolar.com/baterias/acumuladores-estacionarios/>. [Fecha de consulta: 13 de Febrero de 2019].

Thomas, R., Kirisits, M., Lye, D. y Kinney, K. (2014). Rainwater harvesting in the United States: a survey of common system practices. *Journal of Cleaner Production*, 75 (1), 166-173.

Twidell, J. & Weir, T. (2006). Renewable energy resources. 2° Edición, Taylor & Francis, EE. UU., 601 p.

Uchiyama, T., Honda, S., Okayama, T. & Degawa, T. (2016). A feasibility study of power generation from sewage using a hollowed pico-hydraulic turbine. *Engineering*, 2 (1), 510-517.

Vagnoni, E., Andolfatto, L., Richard, S., Münch-Alligné, C., Avellan, F. (2018). Hydraulic performance evaluation of a micro-turbine with counter rotating runners by experimental investigation and numerical simulation. *Renewable Energy*, doi: 10.1016/j.renene.2018.04.015.

Walpole, R., Myers, R., Myers, S., Ye, K. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. 9° Edición, Ed. Pearson Educacion, Mexico, 816 p.

Watson, K., Evans, J., Karvonen, A. & Whitley, T. (2016). Capturing the social value of buildings: The promise of Social Return on Investment (SROI). *Building and environment*, 103 (1), 289-301.

White, F. (2011). Fluid mechanics. 7° Edition, Mc Graw-Hill, EE.UU. 862 p.

Yates, Brian T., & Marra, Mita. (2016), Social Return On Investment (SROI): Problems, Solutions...and Is SROI a Good Investment? *Evaluation and Program Planning*
<http://dx.doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2016.11.009>.

Yanine, F., Córdova, F. & Valenzuela, L. (2015). Sustainable hybrid energy systems: An energy and Exergy management approach with homeostatic control of microgrids. *Procedia Computer Science*, 55 (1), 642-649.

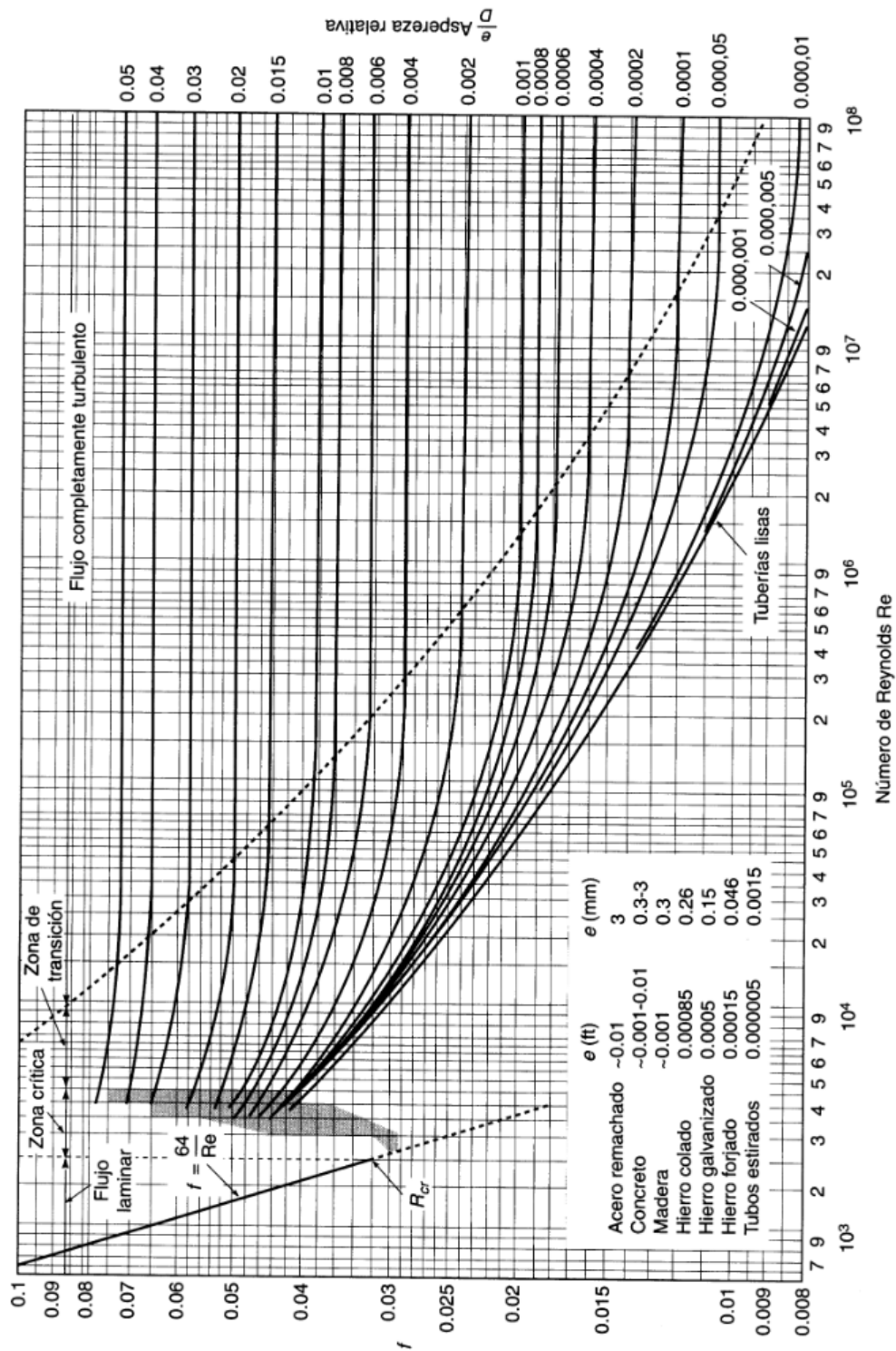
Zamora, M. (2015). Prototipo de nano turbine para la generación de energía eléctrica a partir de la captación de agua de lluvia (Tesis de licenciatura). FI-UAEMex, México.

Zidonis, A. & Aggidis, G. (2016). Pelton turbine: Identifying the optimum number of buckets using CFD. *Journal of Hydrodynamics*, 28(1), 75-83.

Zikanov, O. (2010). Essential computational fluid dynamics. 1° Edition, Ed. Wileys & Sons, EE. UU., 302 p.

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama universal de Moody



Fuente: Sotelo, G. Hidráulica General. 2002.

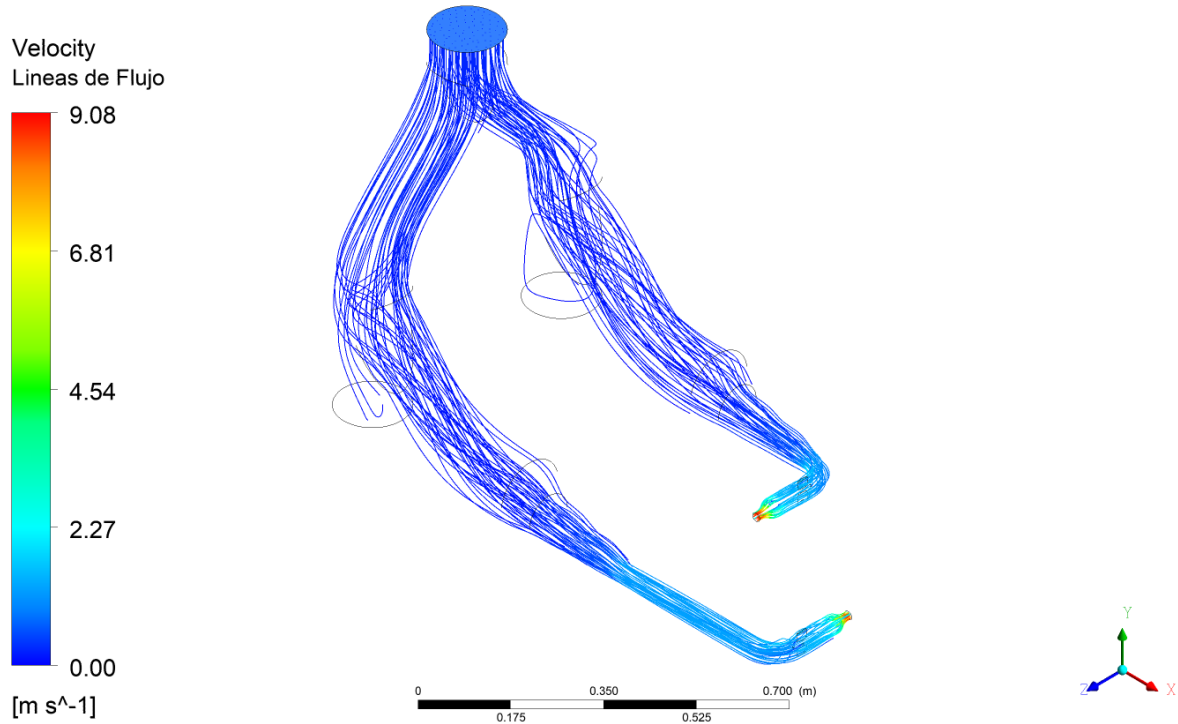
Anexo 2. Valores críticos de la distribución t (estadístico de distribución t)

t	α						
	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.05	0.025
1	0.325	0.727	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706
2	0.289	0.617	1.061	1.386	1.886	2.92	1.303
3	0.277	0.584	0.978	1.25	1.638	2.353	3.182
4	0.271	0.569	0.941	1.19	1.533	2.132	2.776
5	0.267	0.559	0.92	1.156	1.476	2.015	2.571
6	0.265	0.553	0.906	1.134	1.144	1.943	2.447
7	0.263	0.549	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365
8	0.262	0.546	0.889	1.108	1.397	1.96	2.306
9	0.261	0.543	0.883	1.100	1.383	1.833	2.62
10	0.26	0.542	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228
11	0.26	0.54	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201
12	0.259	0.539	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179
13	0.259	0.537	0.87	1.079	1.35	1.771	2.16
14	0.258	0.537	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145
15	0.258	0.536	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131
16	0.258	0.535	0.865	1.071	1.337	1.746	2.12
17	0.257	0.534	0.863	1.069	1.333	1.74	2.11
18	0.257	0.534	0.862	1.067	1.33	1.734	2.101
19	0.257	0.533	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093
20	0.257	0.533	0.86	1.064	1.325	1.725	2.086
21	0.257	0.532	0.859	1.063	1.323	1.721	2.08
22	0.256	0.532	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074
23	0.256	0.532	0.858	1.06	1.319	1.714	2.079
24	0.256	0.531	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064
25	0.256	0.531	0.856	1.058	1.316	1.708	2.06
26	0.256	0.531	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056
27	0.256	0.531	0.855	1.058	1.314	1.703	2.052
28	0.256	0.53	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048
29	0.256	0.53	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045
30	0.256	0.53	0.854	1.055	1.31	1.697	2.042
40	0.255	0.529	0.851	1.05	1.303	1.684	2.021
60	0.254	0.527	0.848	1.045	1.296	1.671	2.00
120	0.254	0.526	0.845	1.041	1.289	1.658	1.98
∞	0.253	0.524	0.842	1.036	1.282	1.645	1.96

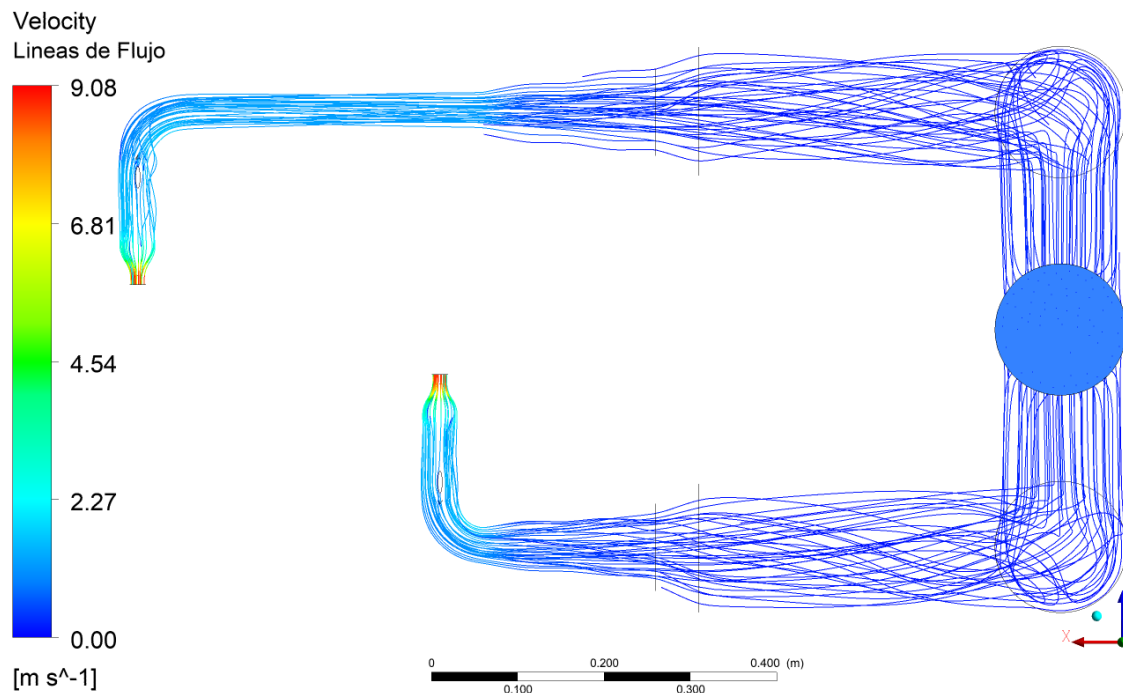
Anexo 3. Resultados obtenidos mediante Dinámica de Fluidos Computacional

Bajada de lluvia – Escenario mínimo ($H_T = 4.5 \text{ m}$, $\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

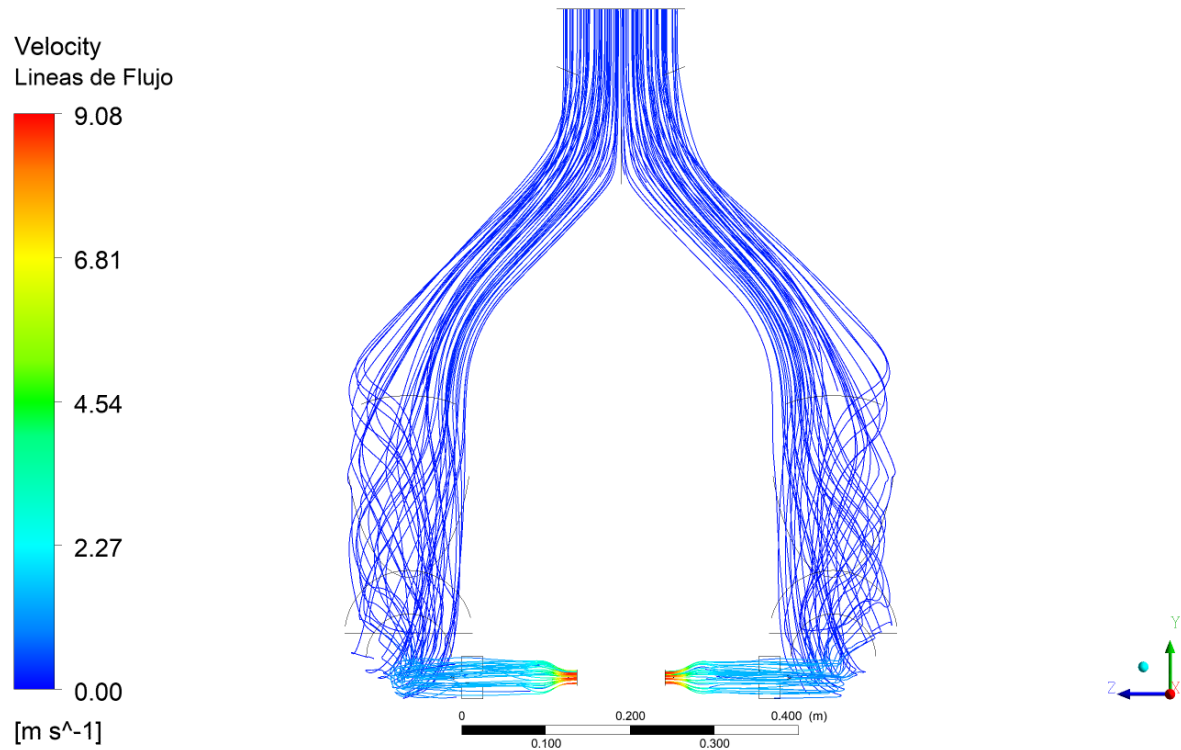
Líneas de flujo en el dominio de la bajada (Velocidad) – Vista Isométrica



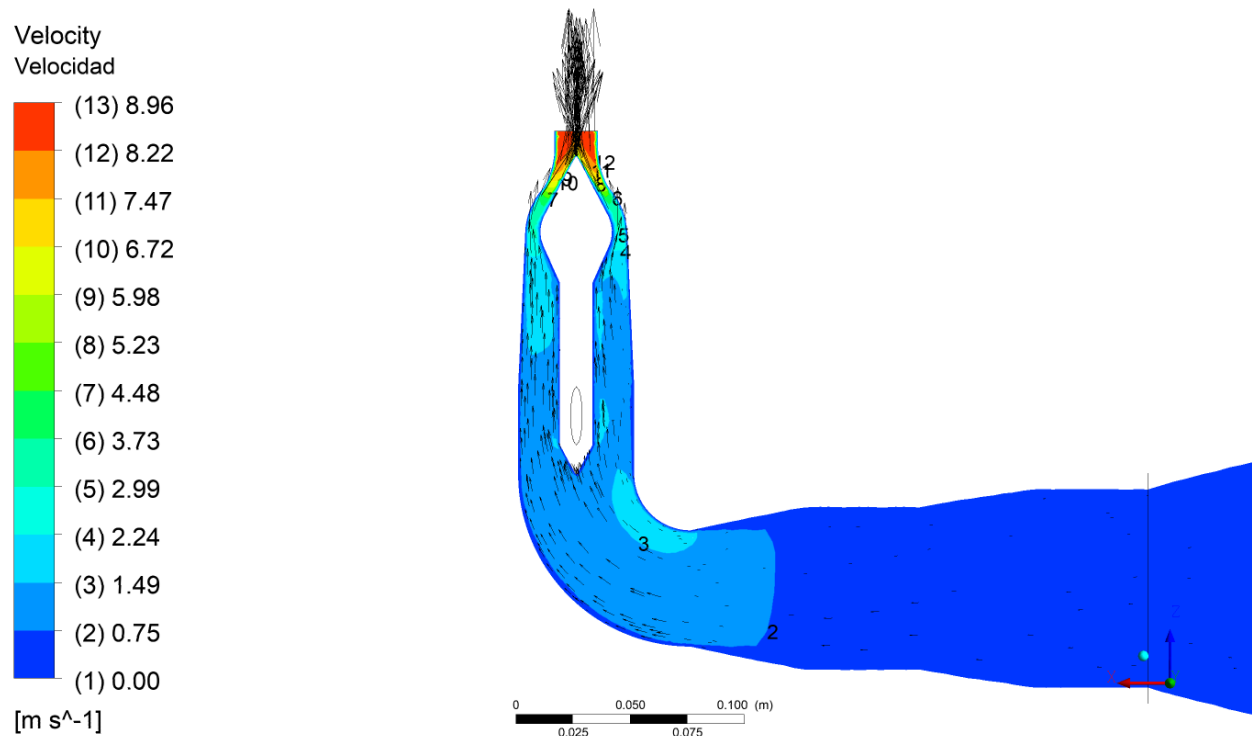
Líneas de flujo en el dominio de la bajada (Velocidad) – Vista Superior



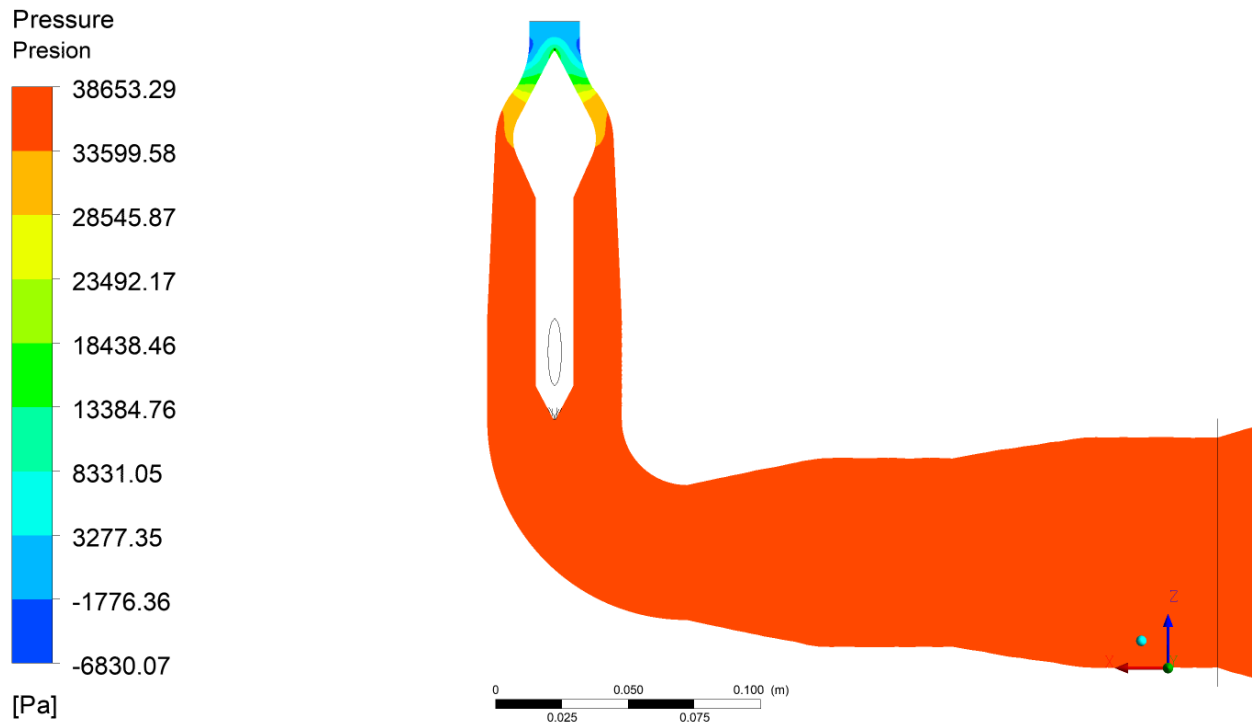
Líneas de flujo en el dominio de la bajada (Velocidad) – Frontal



Campo de velocidades en la región de la boquilla

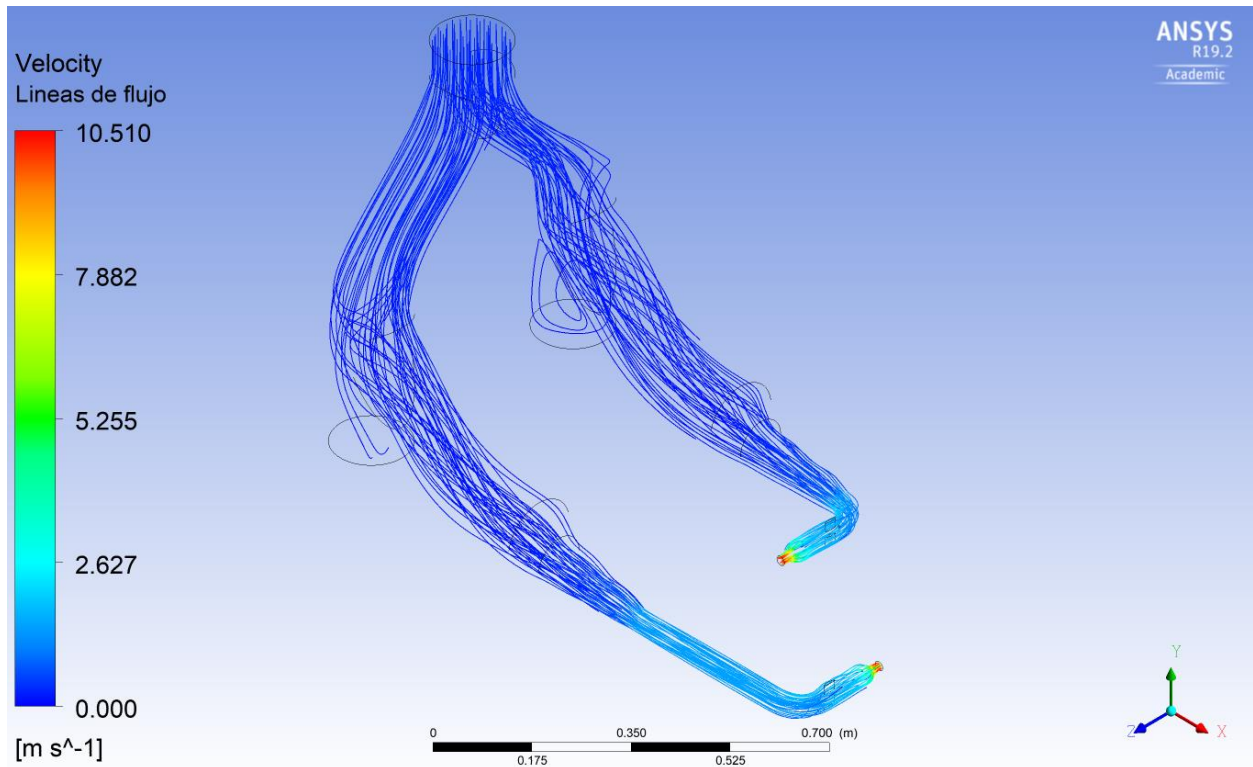


Campo de presión en la región de la boquilla

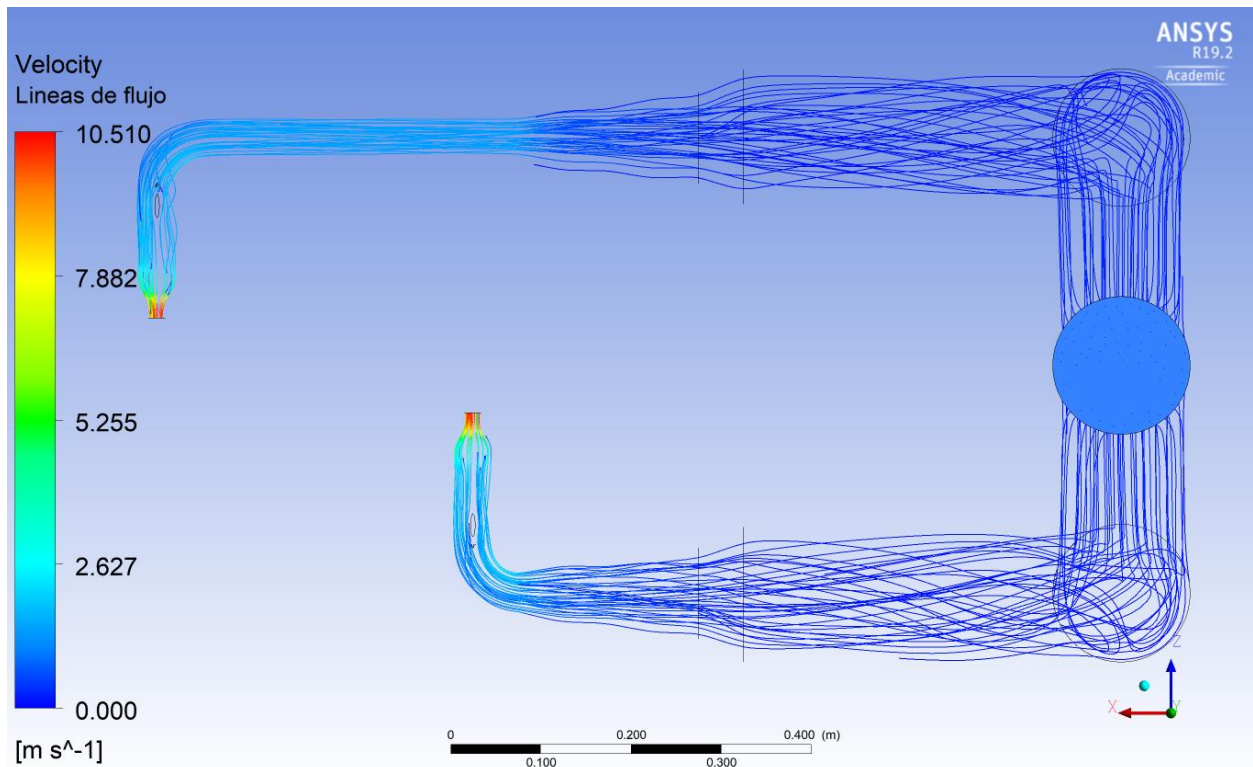


Bajada de lluvia – Escenario medio ($H_T = 6.0 \text{ m}$, $\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

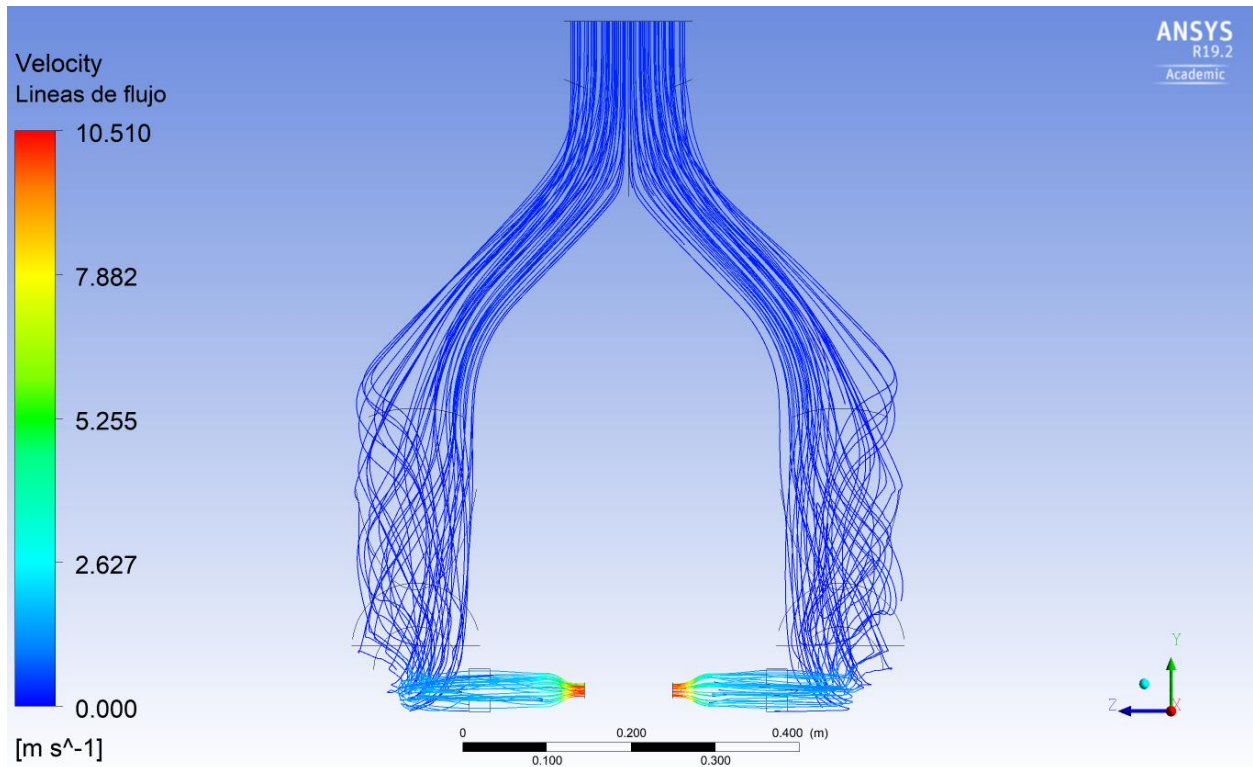
Líneas de flujo en el dominio de la bajada (Velocidad) – Vista Isométrica



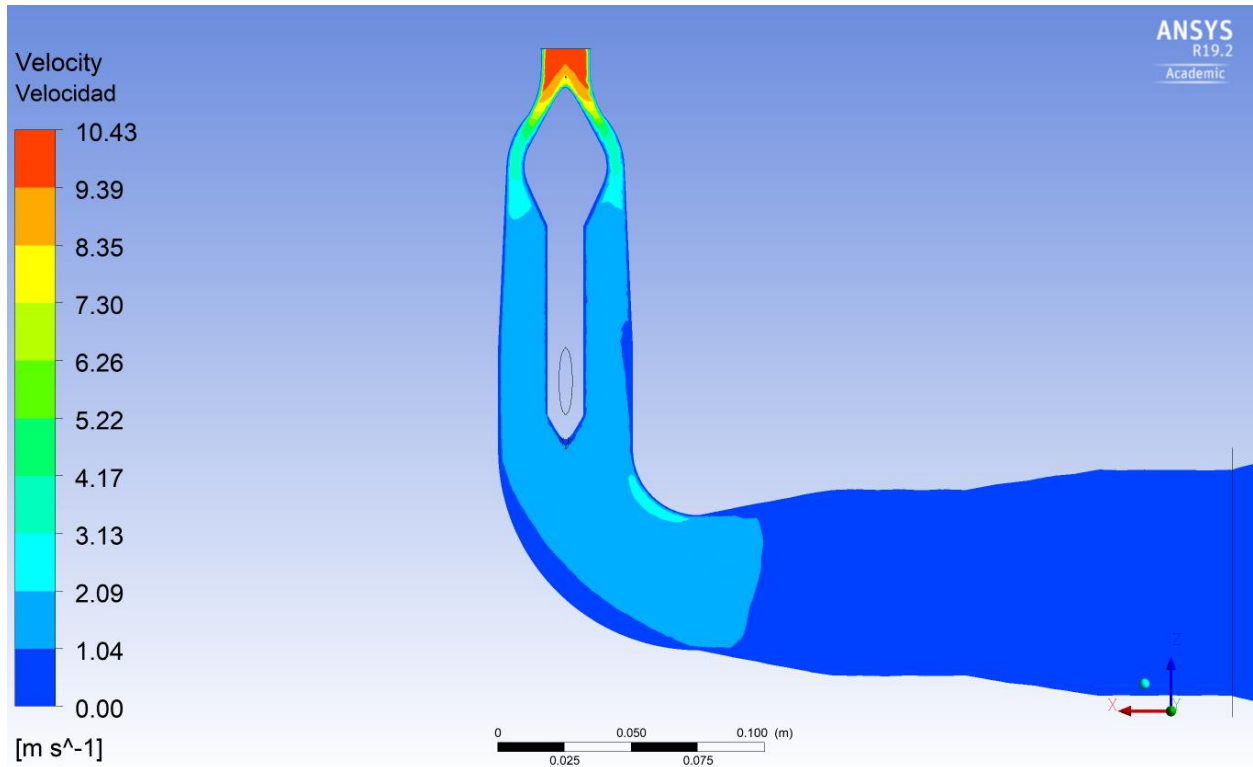
Líneas de flujo en el dominio de la bajada (Velocidad) – Vista superior



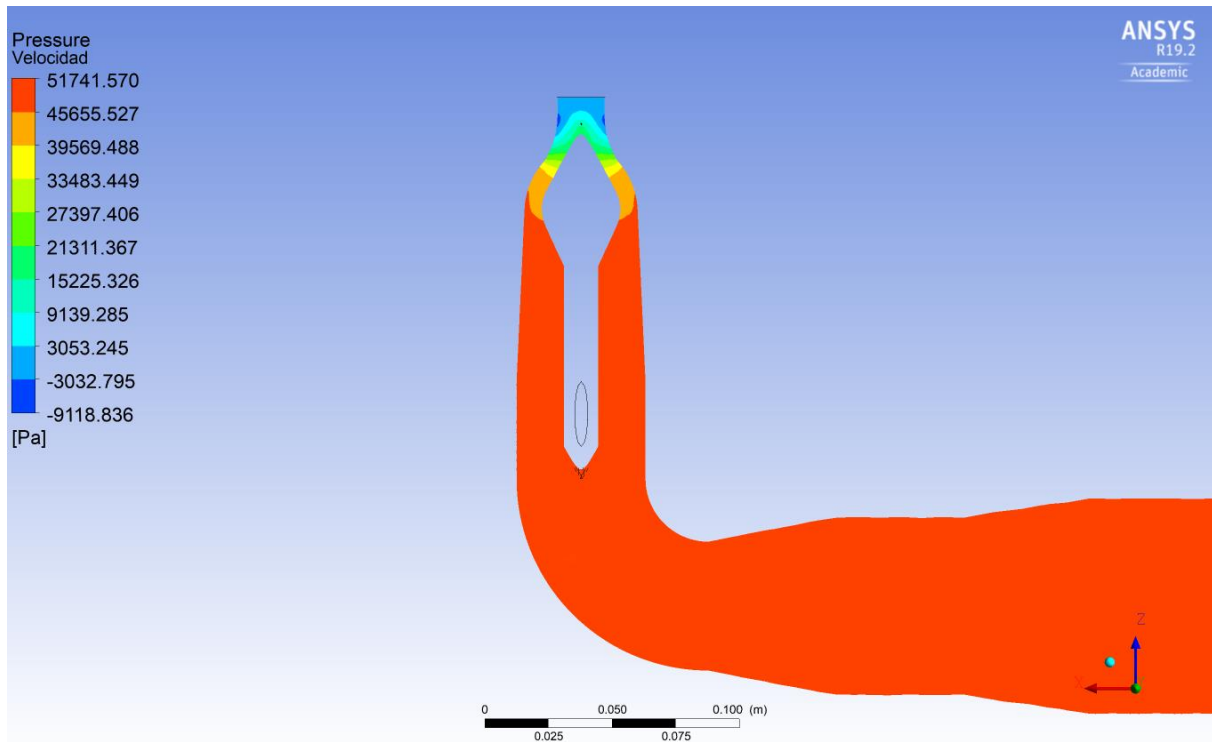
Líneas de flujo en el dominio de la bajada (Velocidad) – Vista frontal



Campo de velocidades en la región de la boquilla

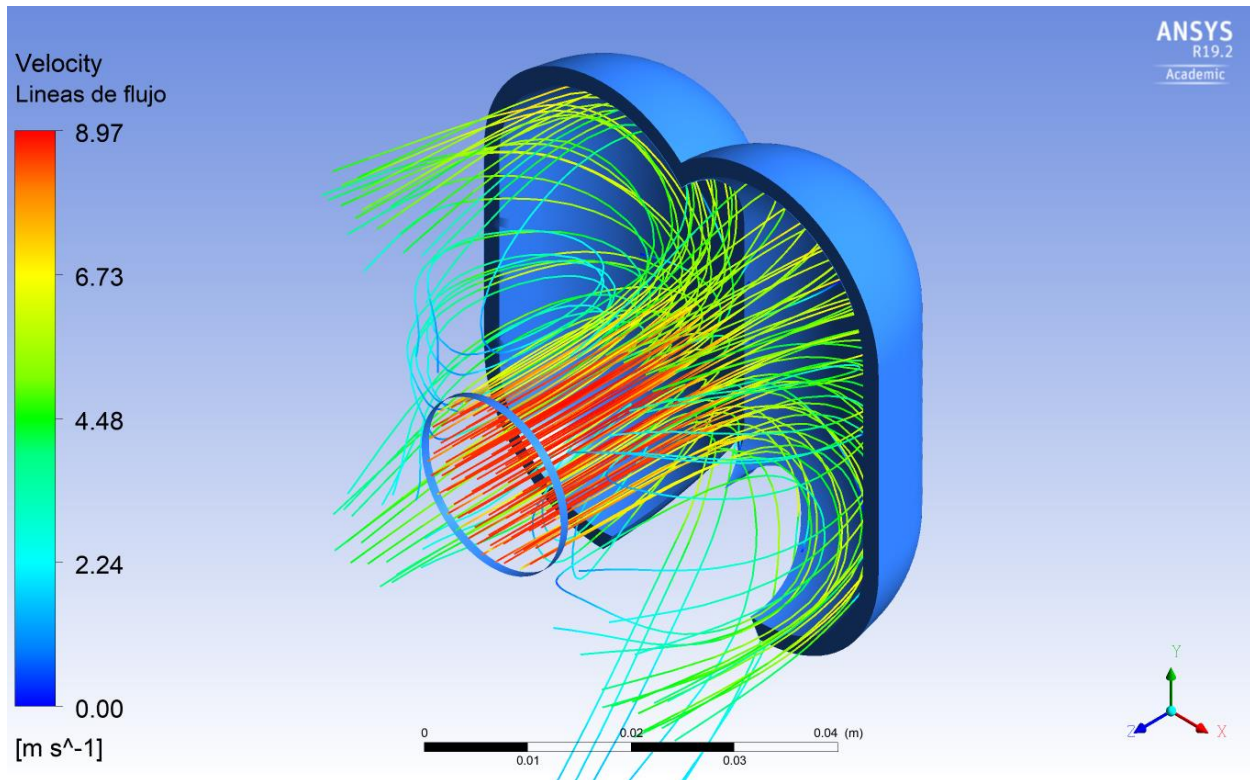


Campo de presión en la región de la boquilla

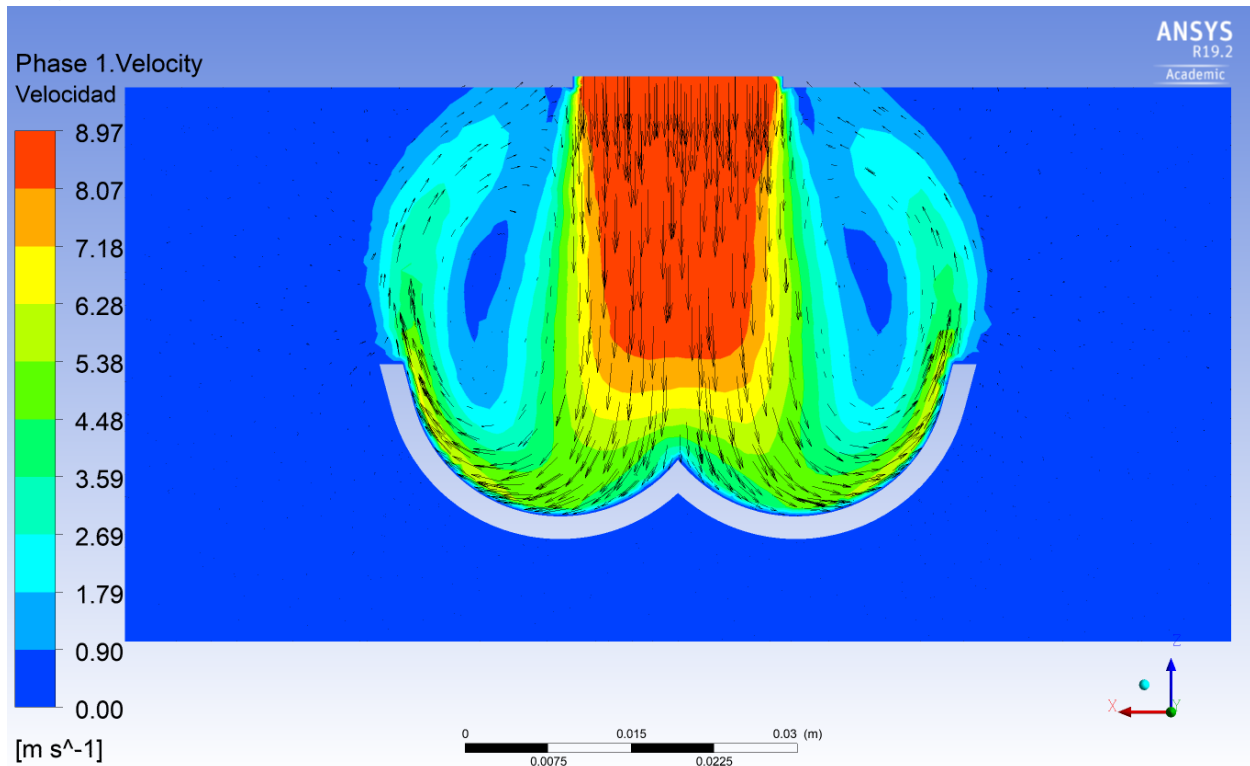


Cazoleta_1.28 $d_{jet_2.79}$ d_{jet} – Escenario mínimo ($\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{m}{s}, H_T = 4.5 m$)

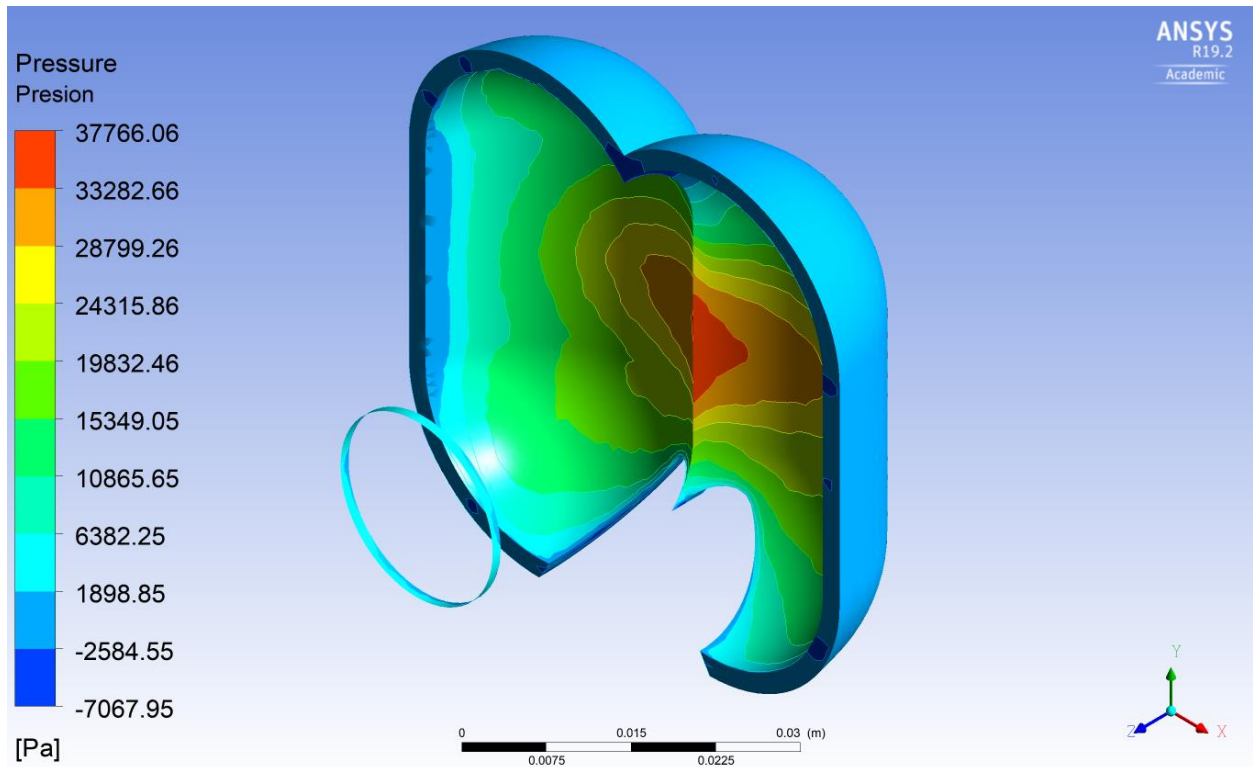
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



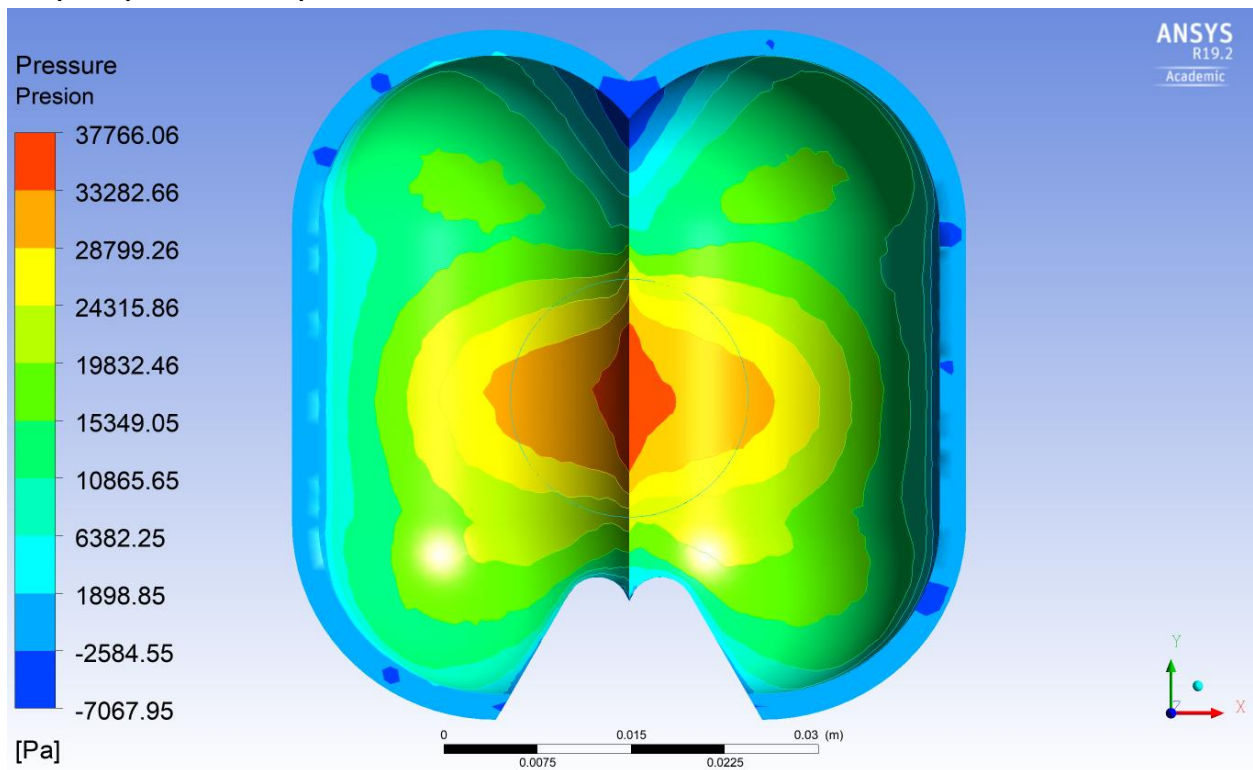
Campo de velocidades en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

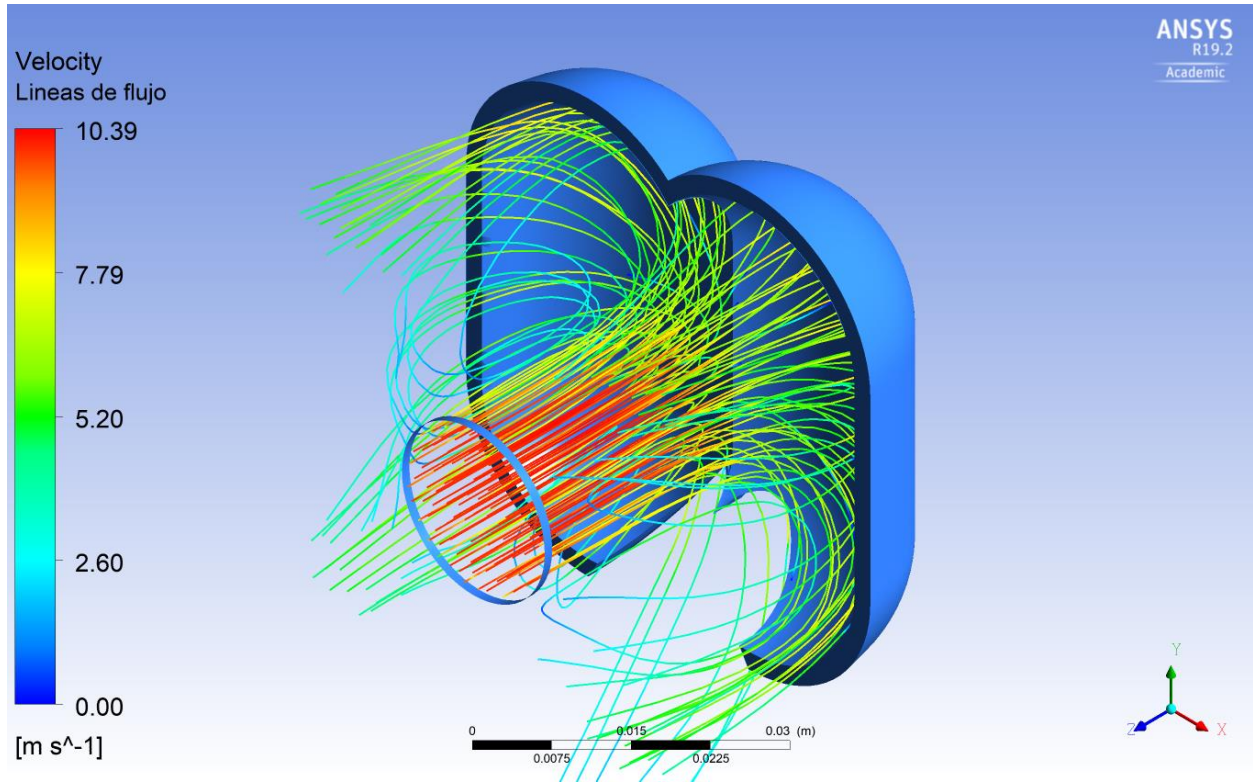


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

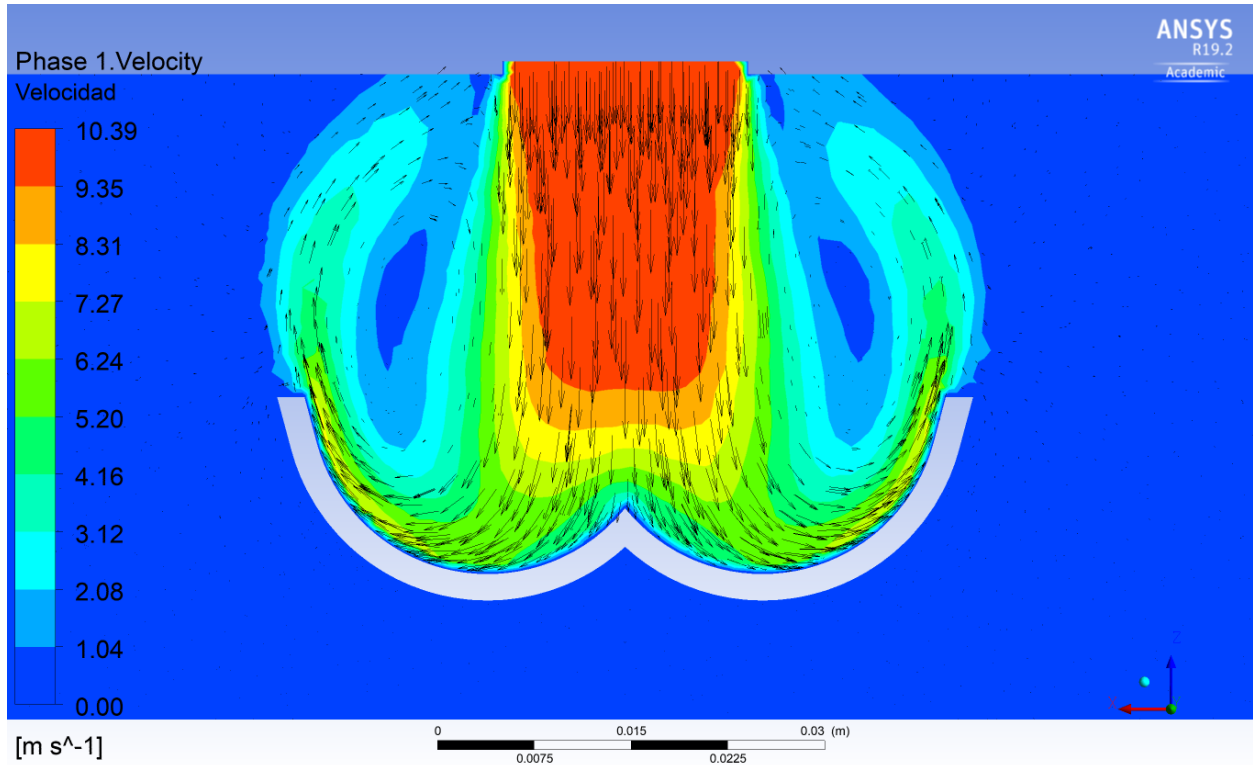


Cazoleta_1.28 $d_{jet_2.79}$ d_{jet} – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$)

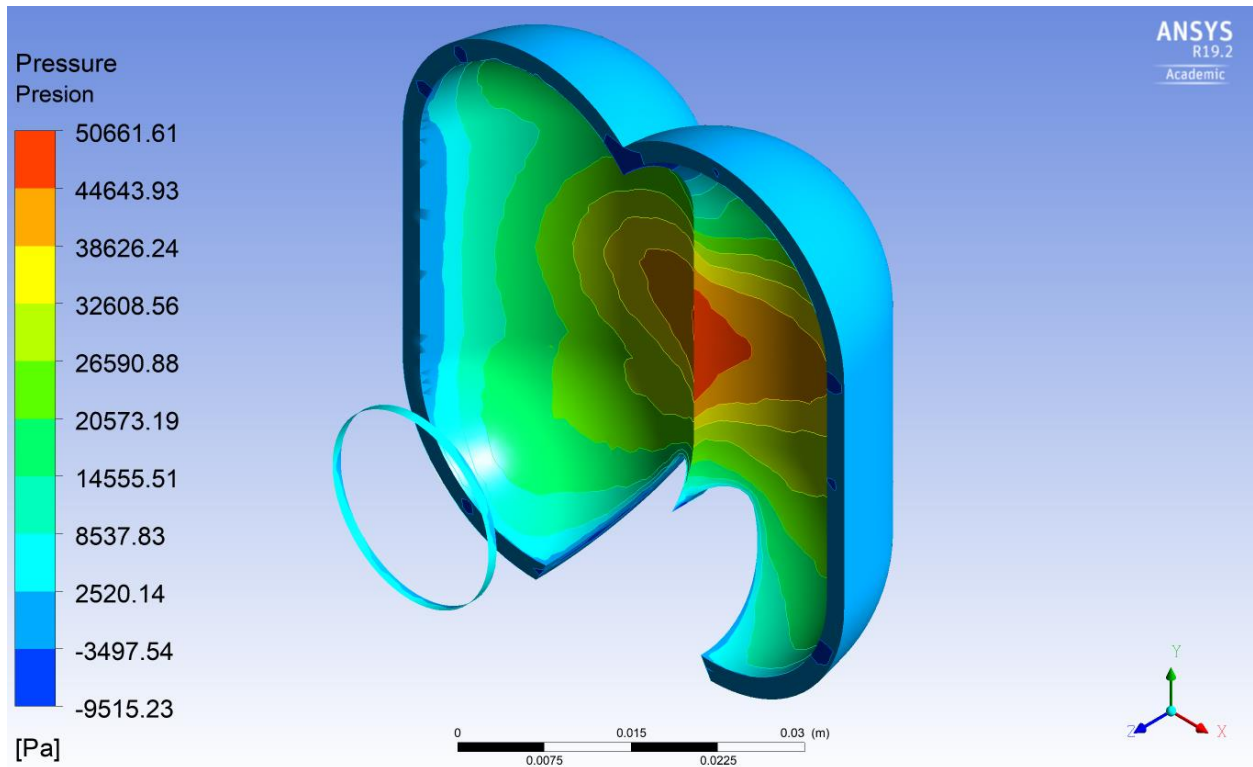
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



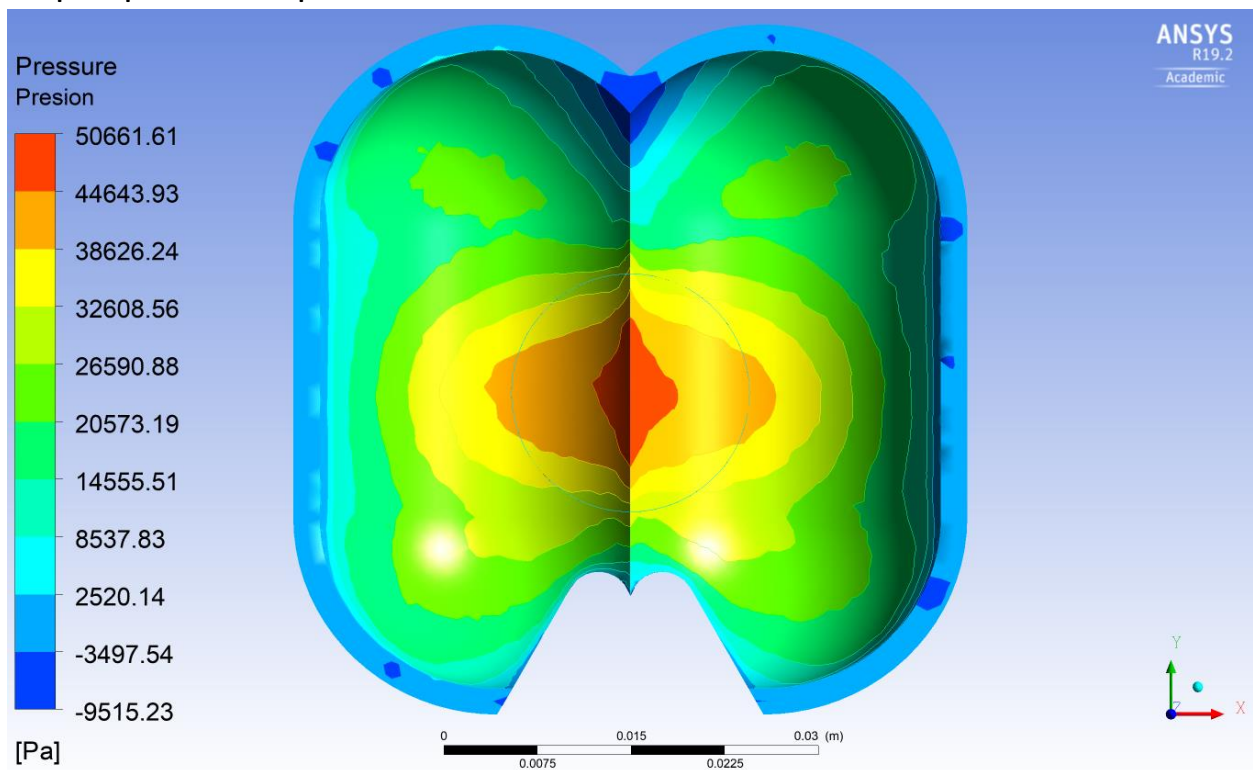
Campo de velocidades en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

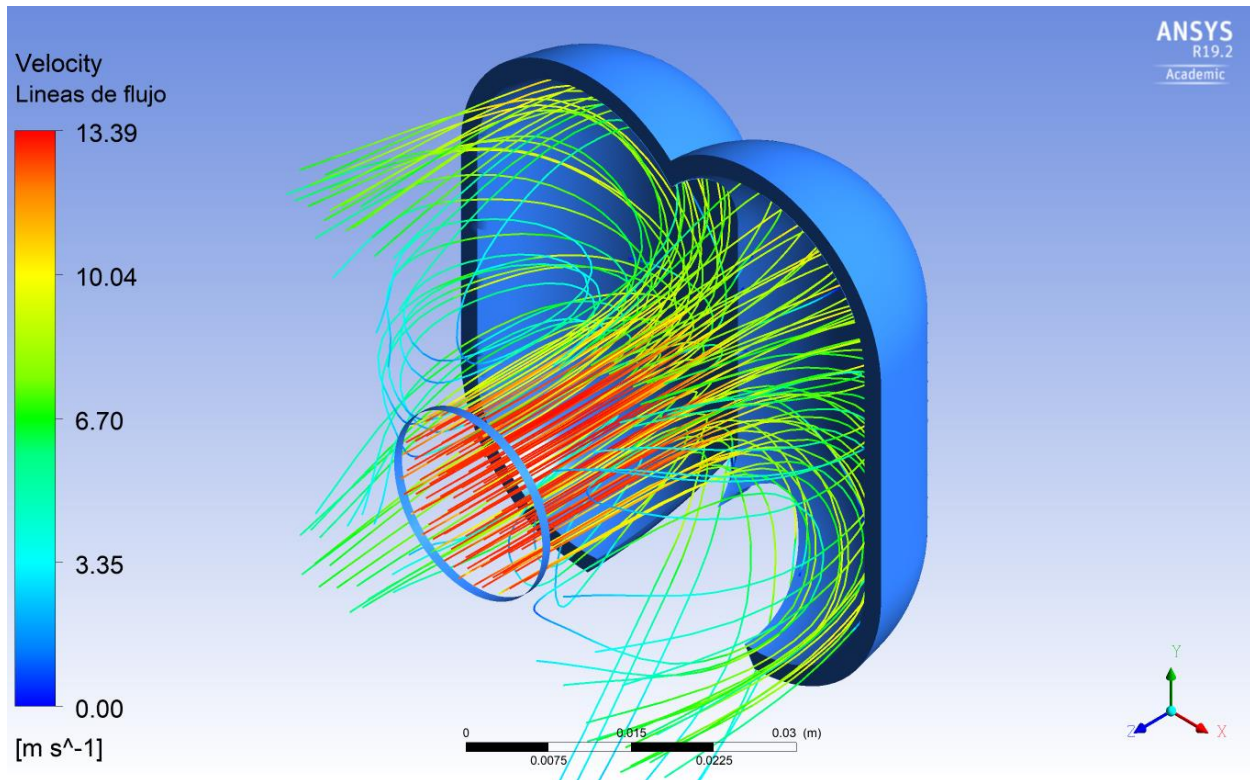


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

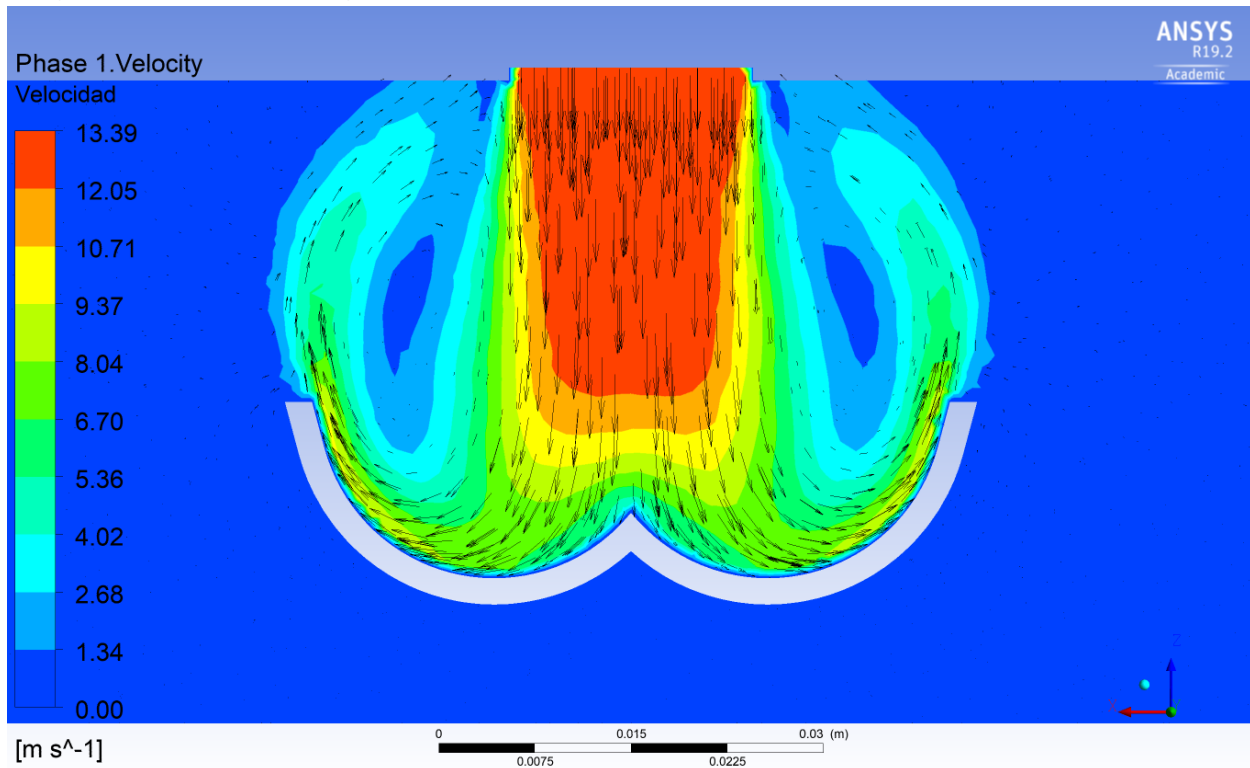


Cazoleta_1.28 $d_{jet_2.79}$ d_{jet} – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}$, $H_T = 10.0 m$)

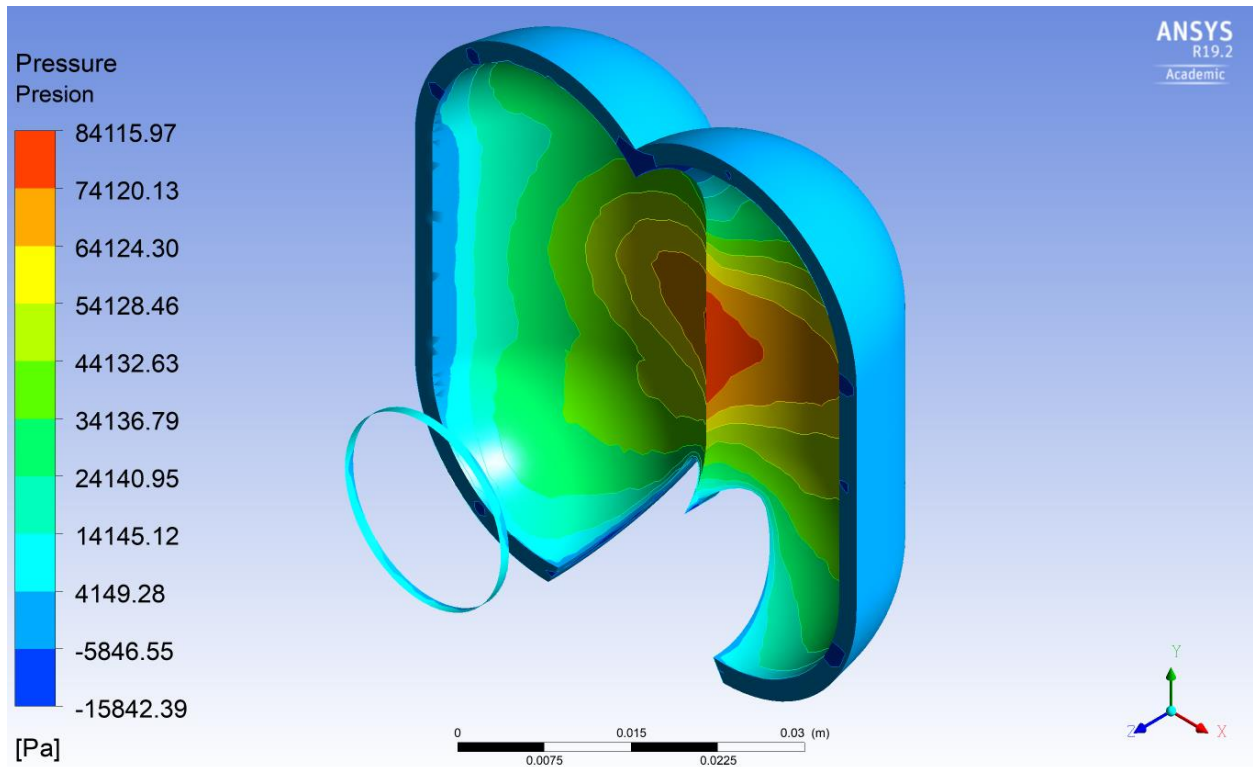
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



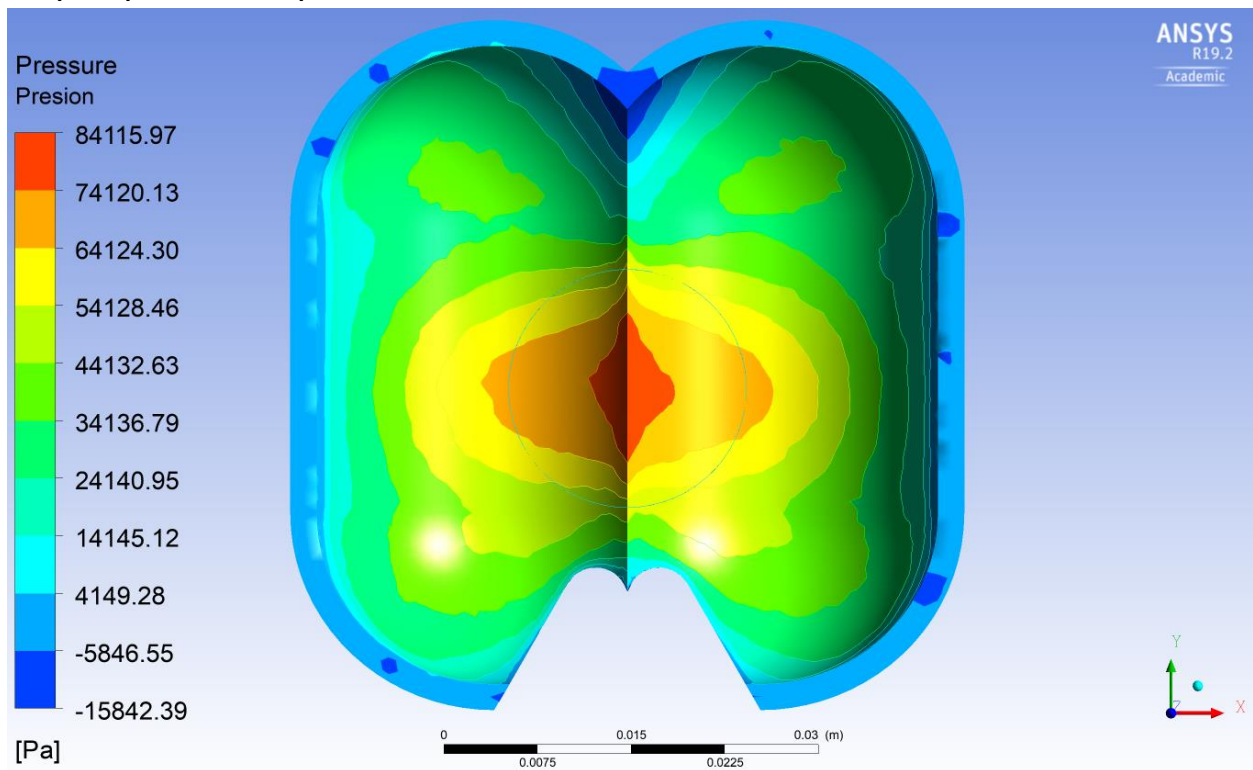
Campo de velocidades en la superficie de la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

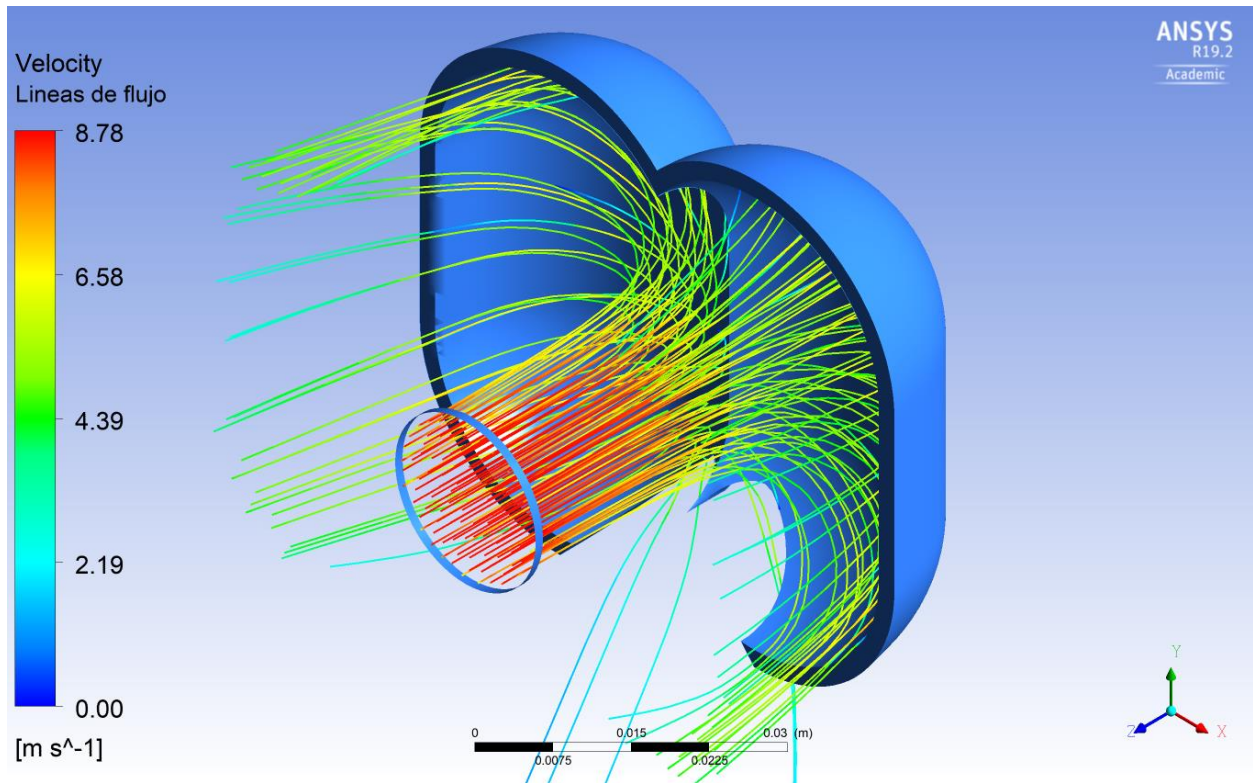


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

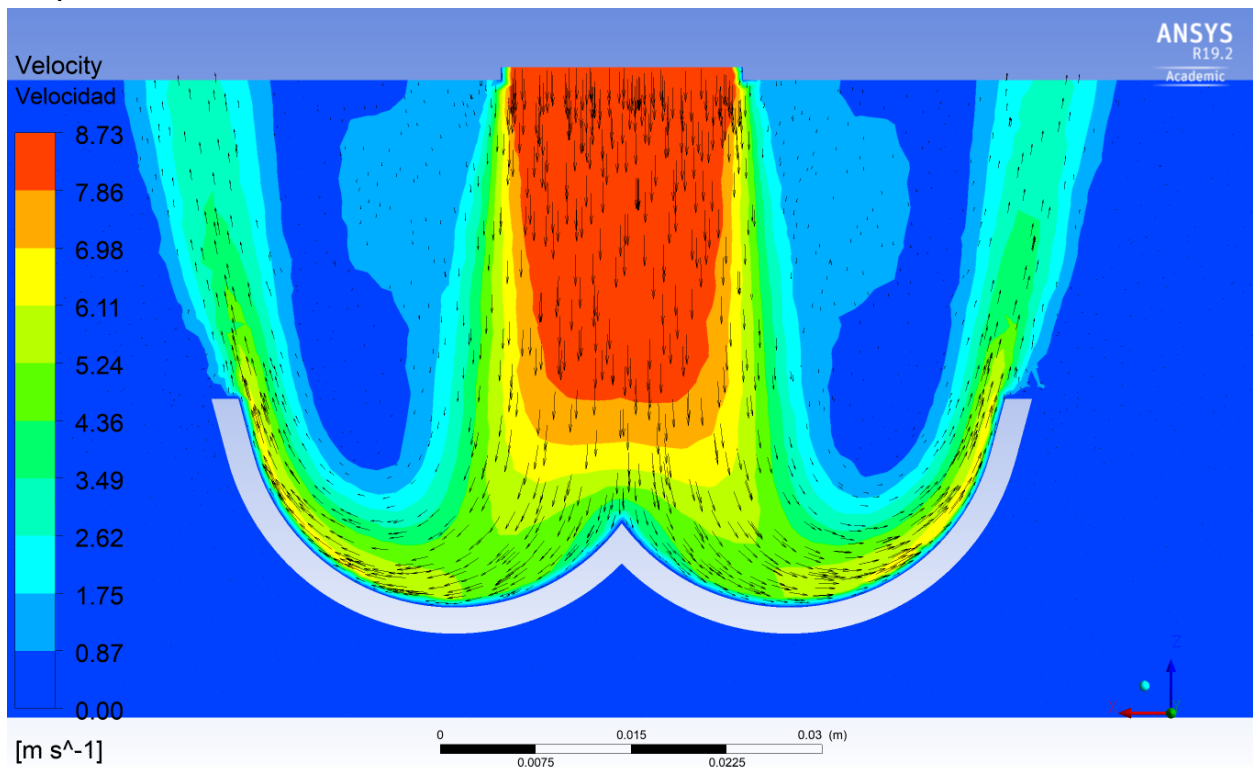


Cazoleta_1.55 d_{jet} _2.79 d_{jet} – Escenario mínimo ($\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{m}{s}, H_T = 4.5 m$)

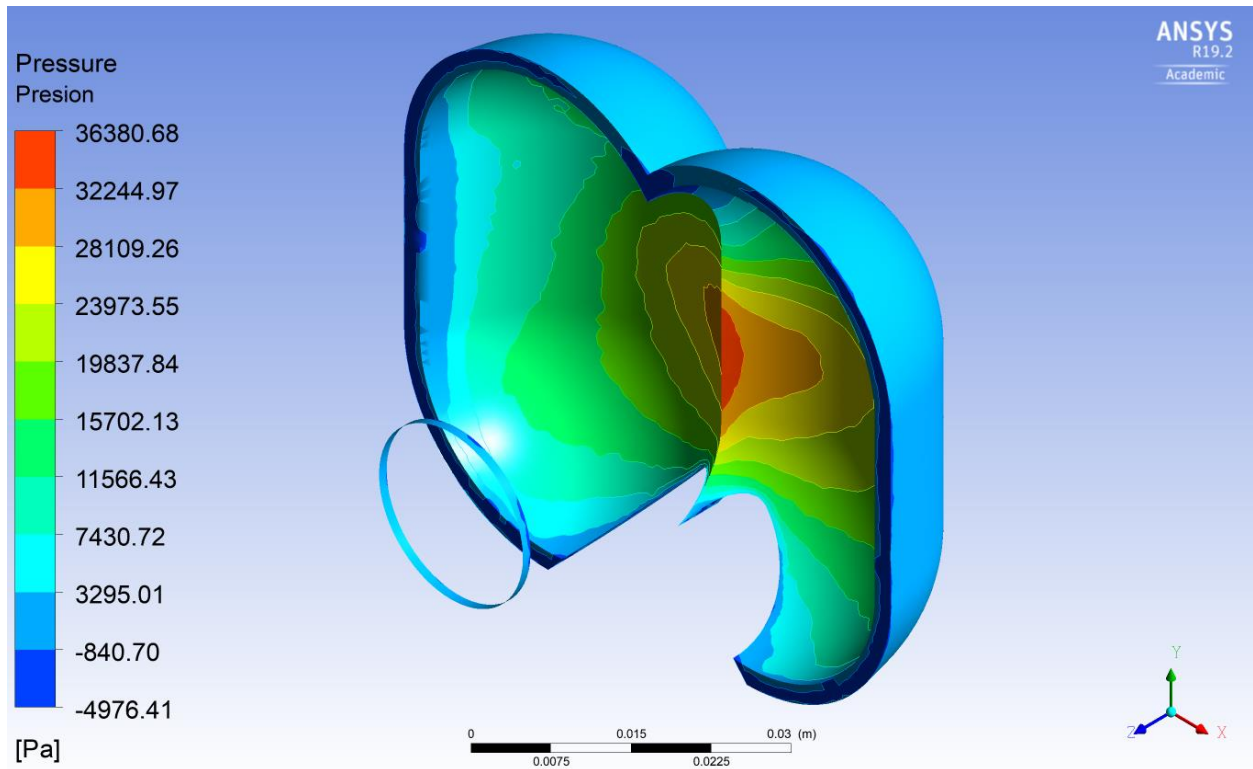
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



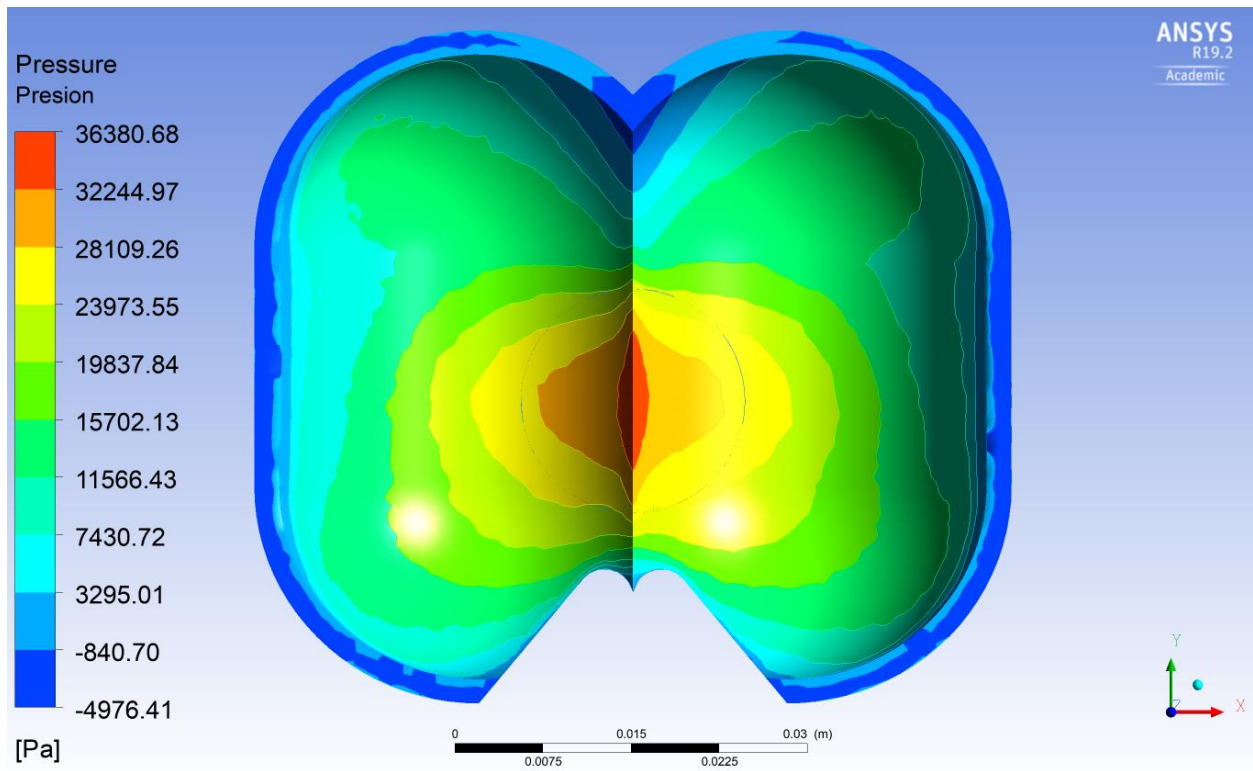
Campo de velocidades en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

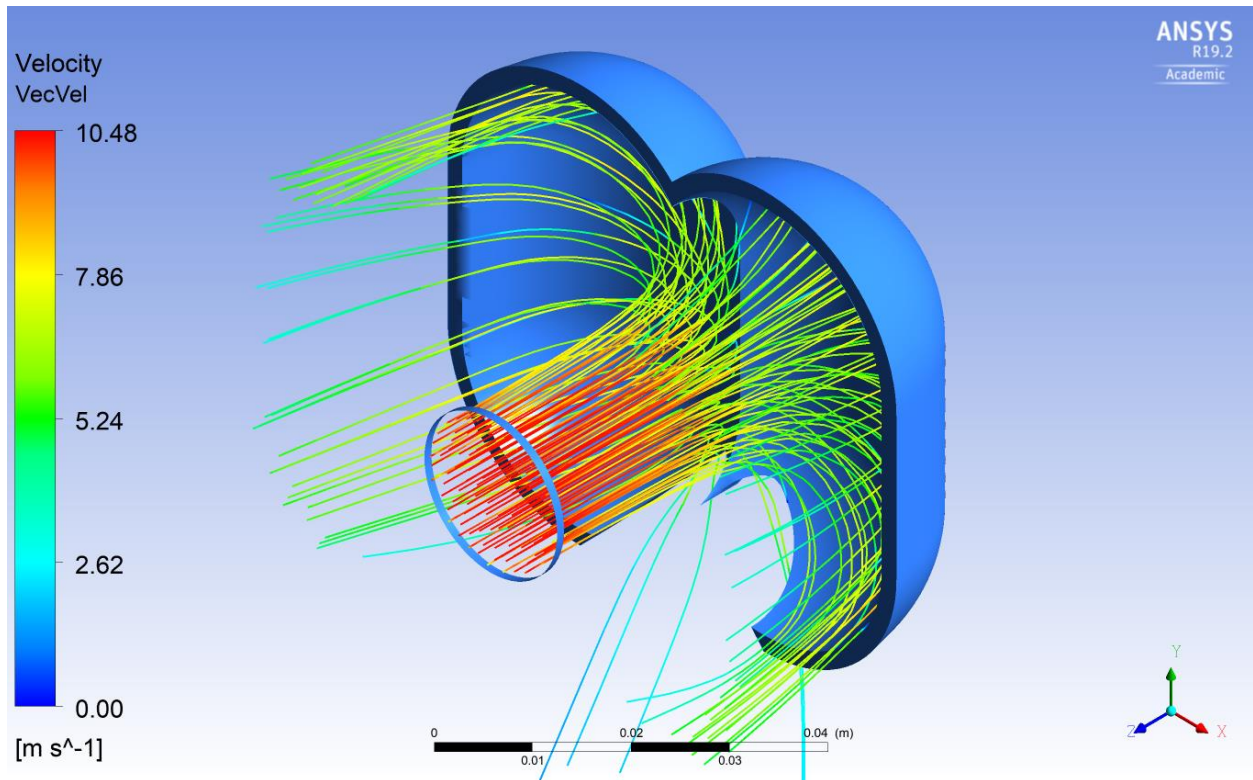


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

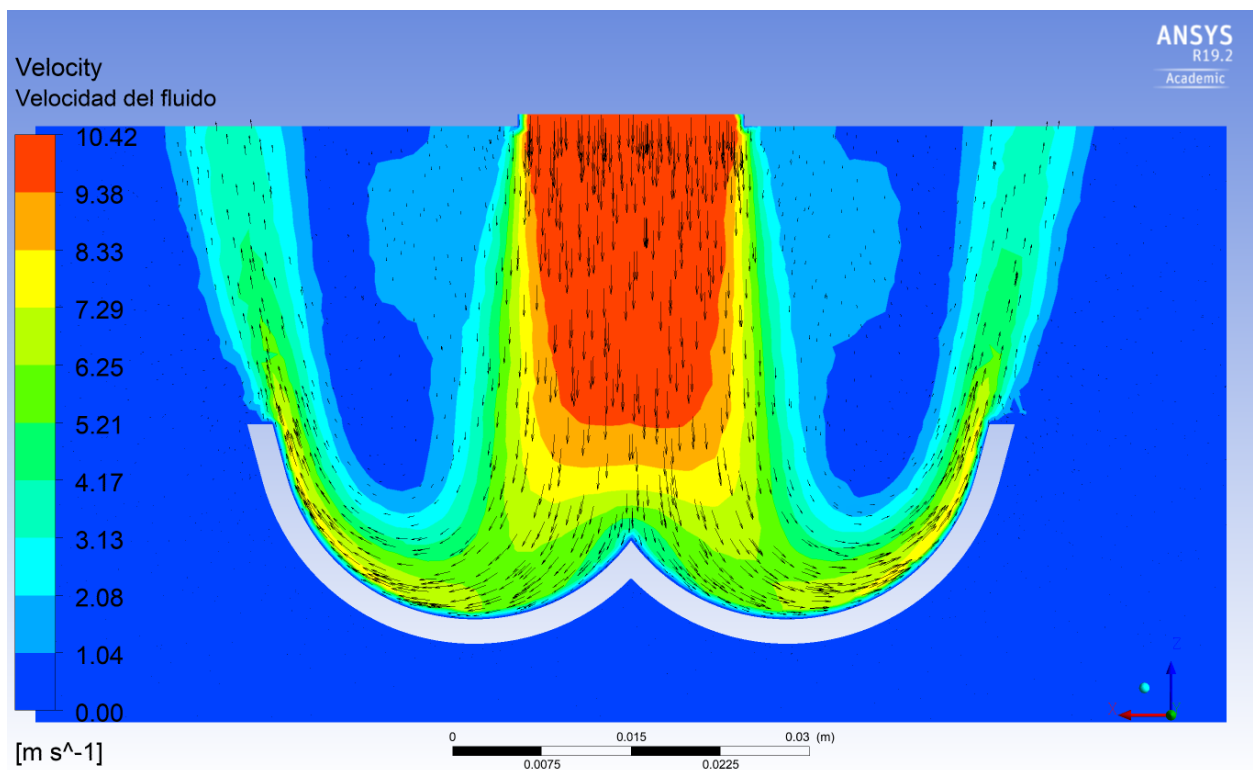


Cazoleta_1.55 d_{jet} _2.79 d_{jet} – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$)

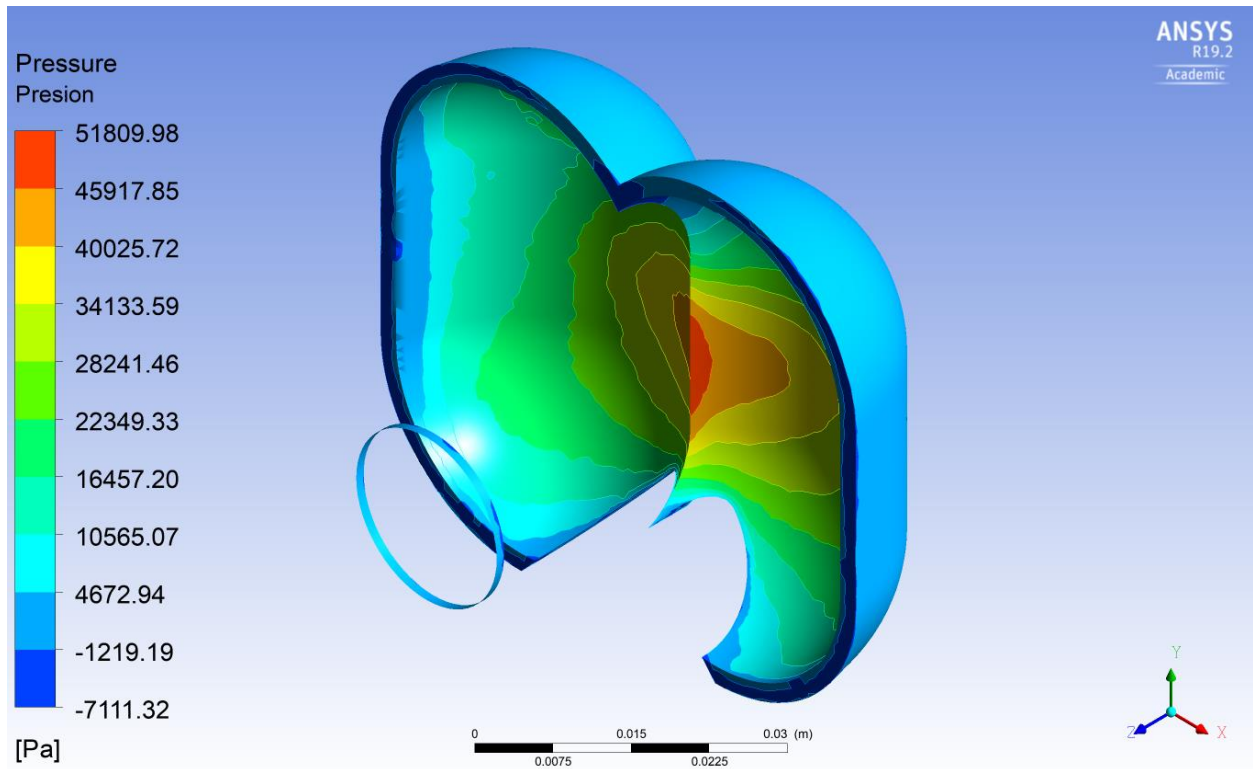
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



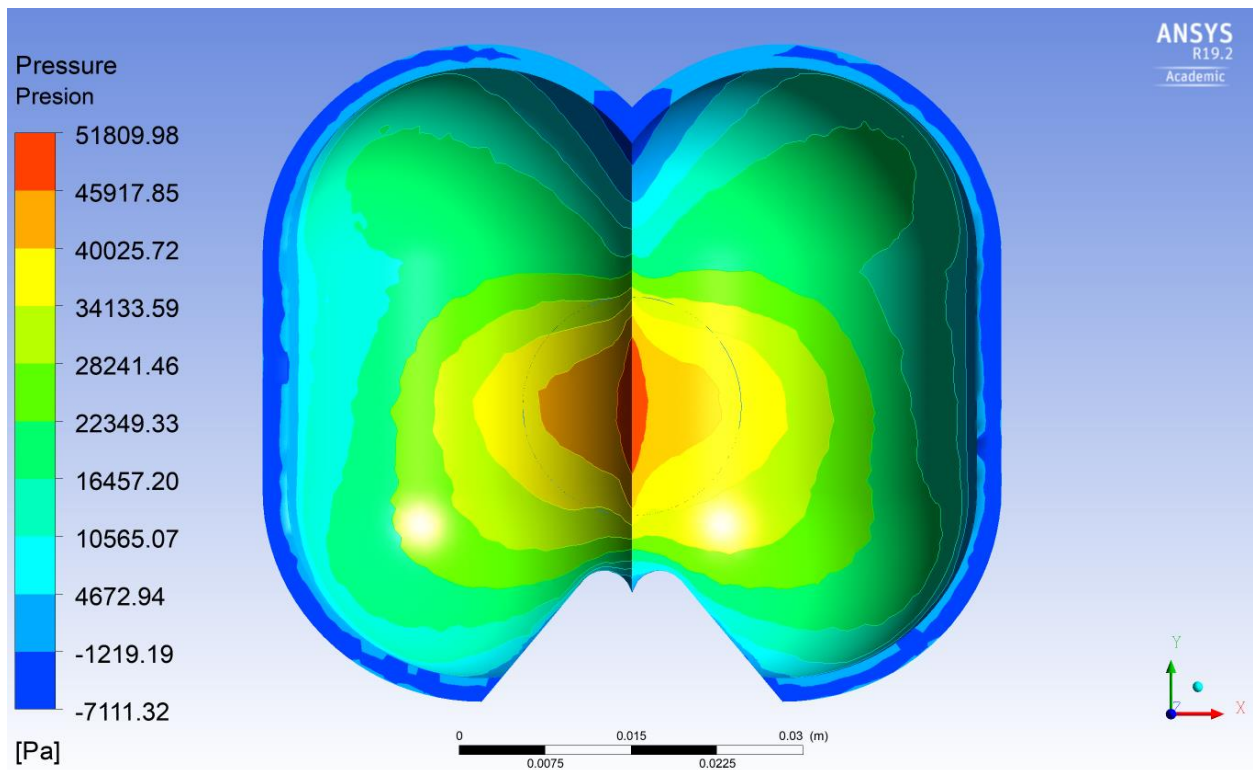
Campo de velocidades en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

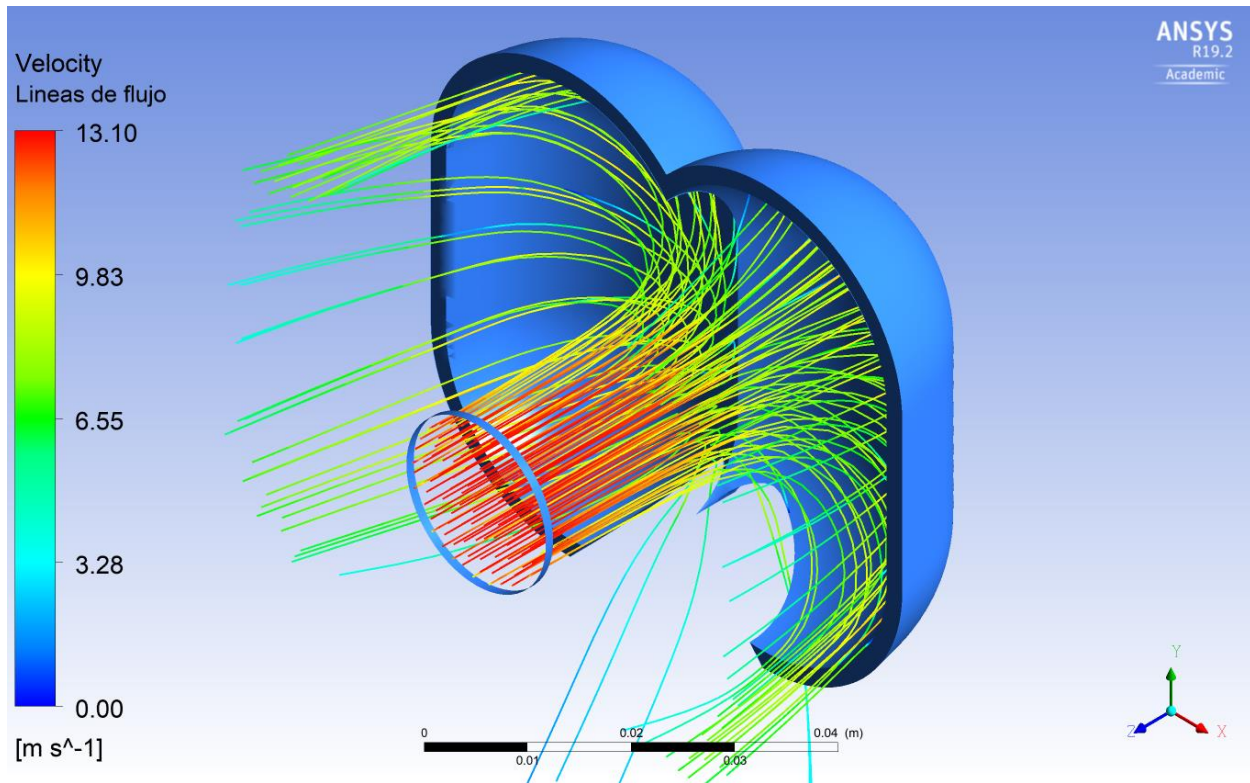


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

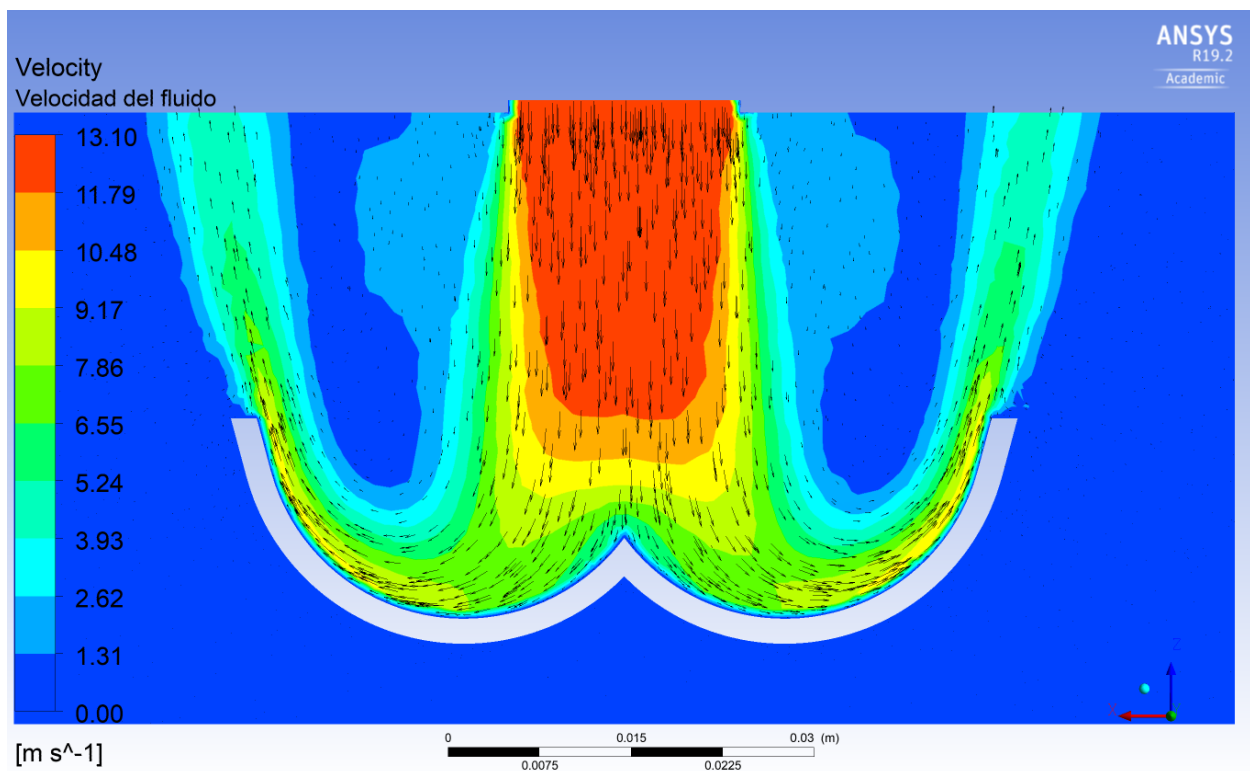


Cazoleta_1.55 d_{jet} _2.79 d_{jet} – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}$, $H_T = 10.0 m$)

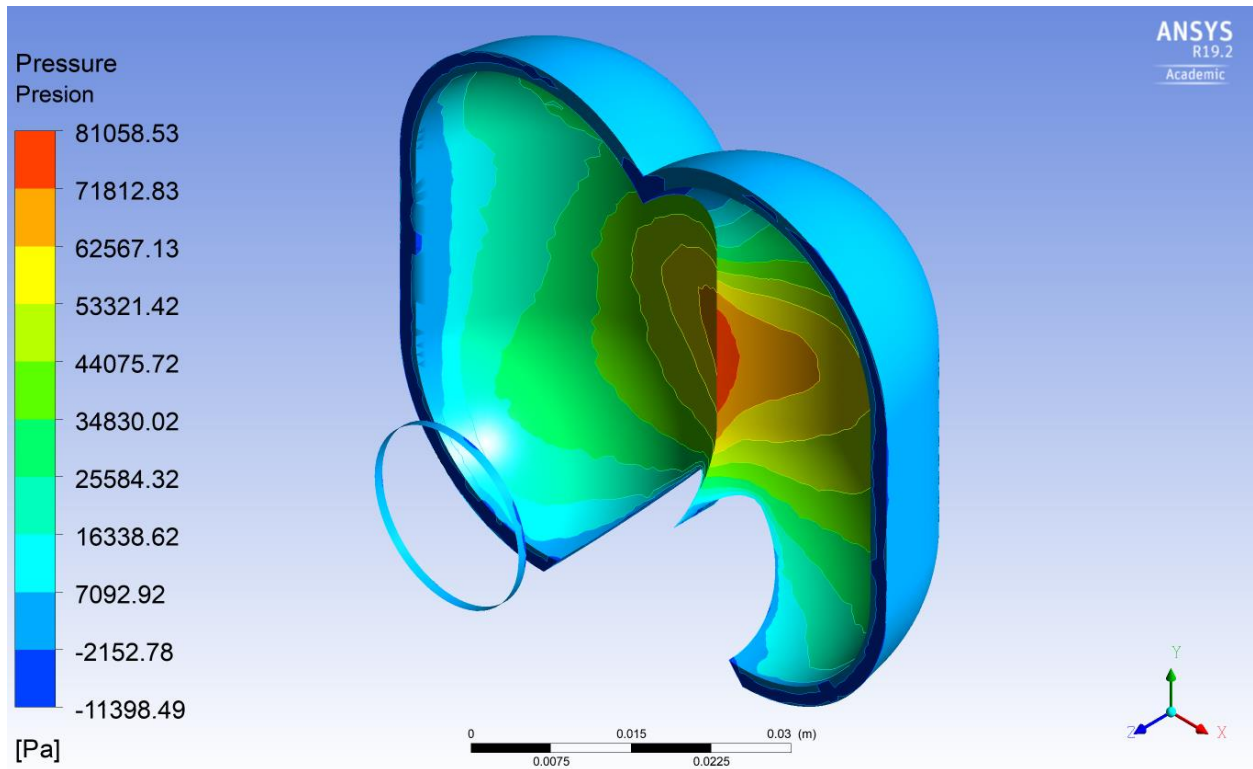
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



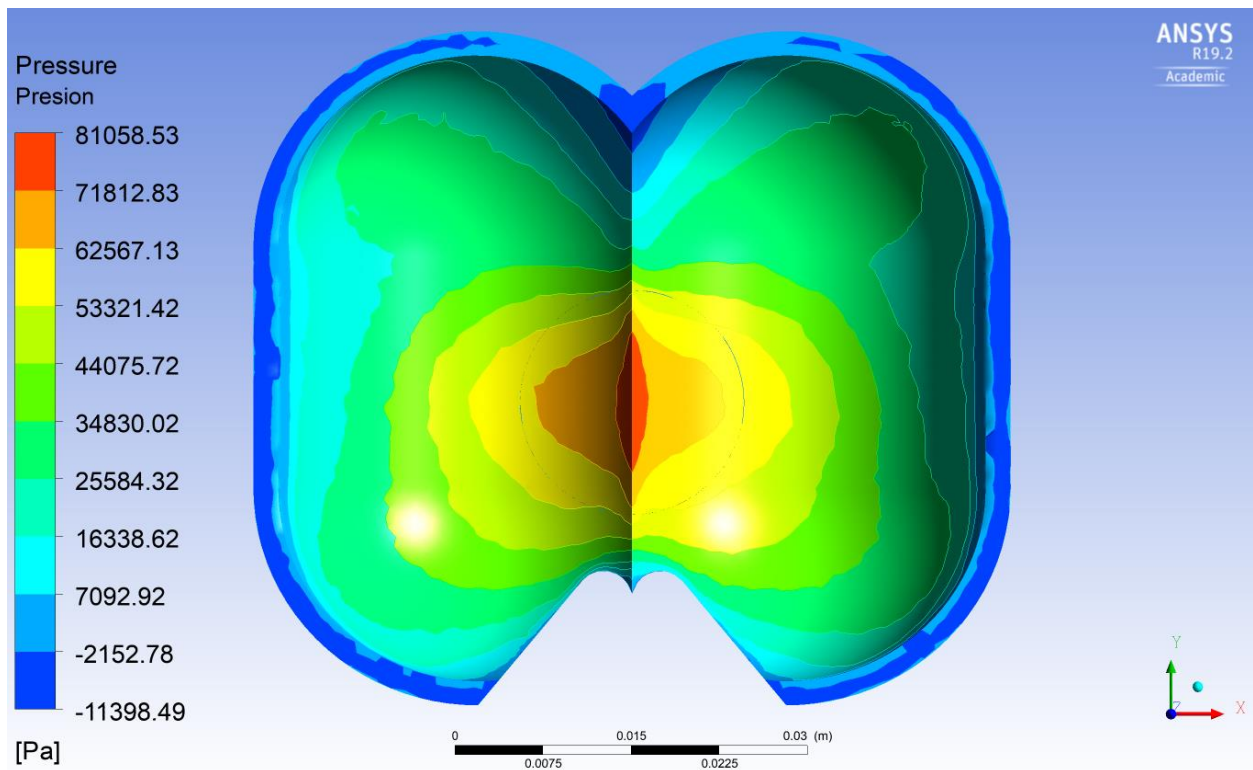
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

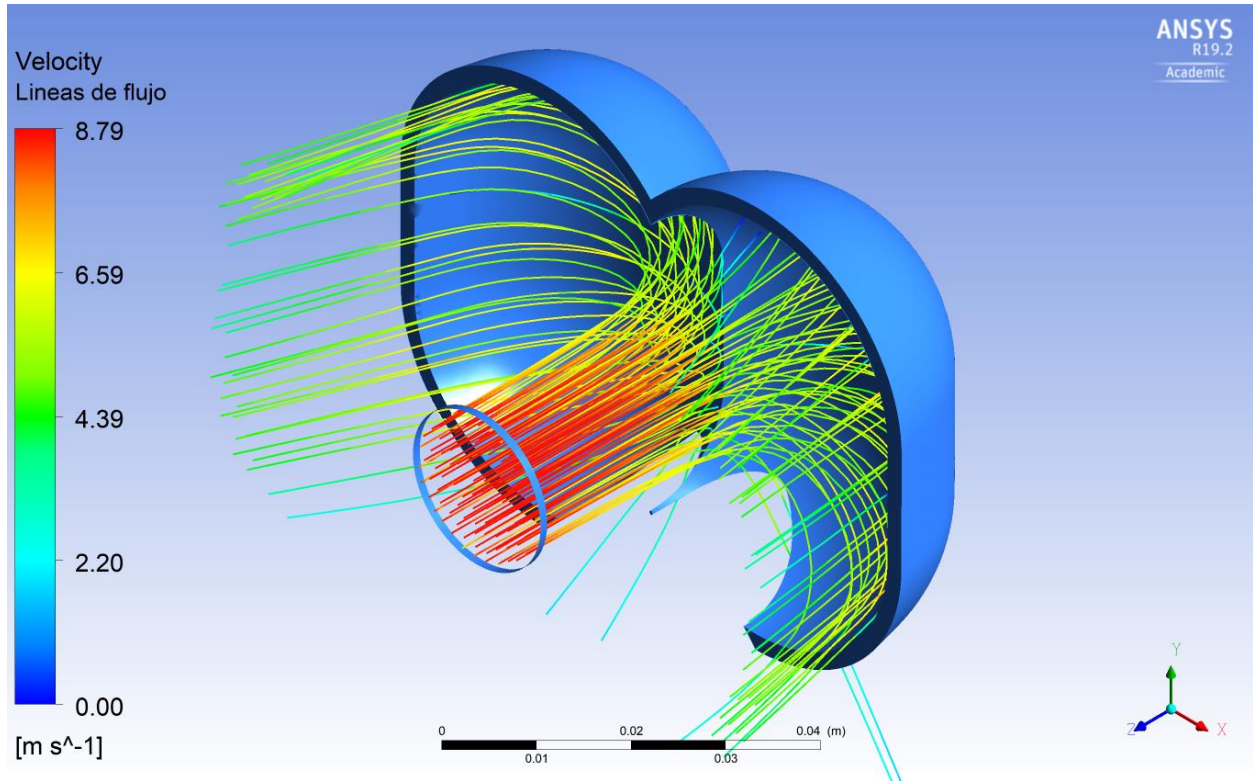


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

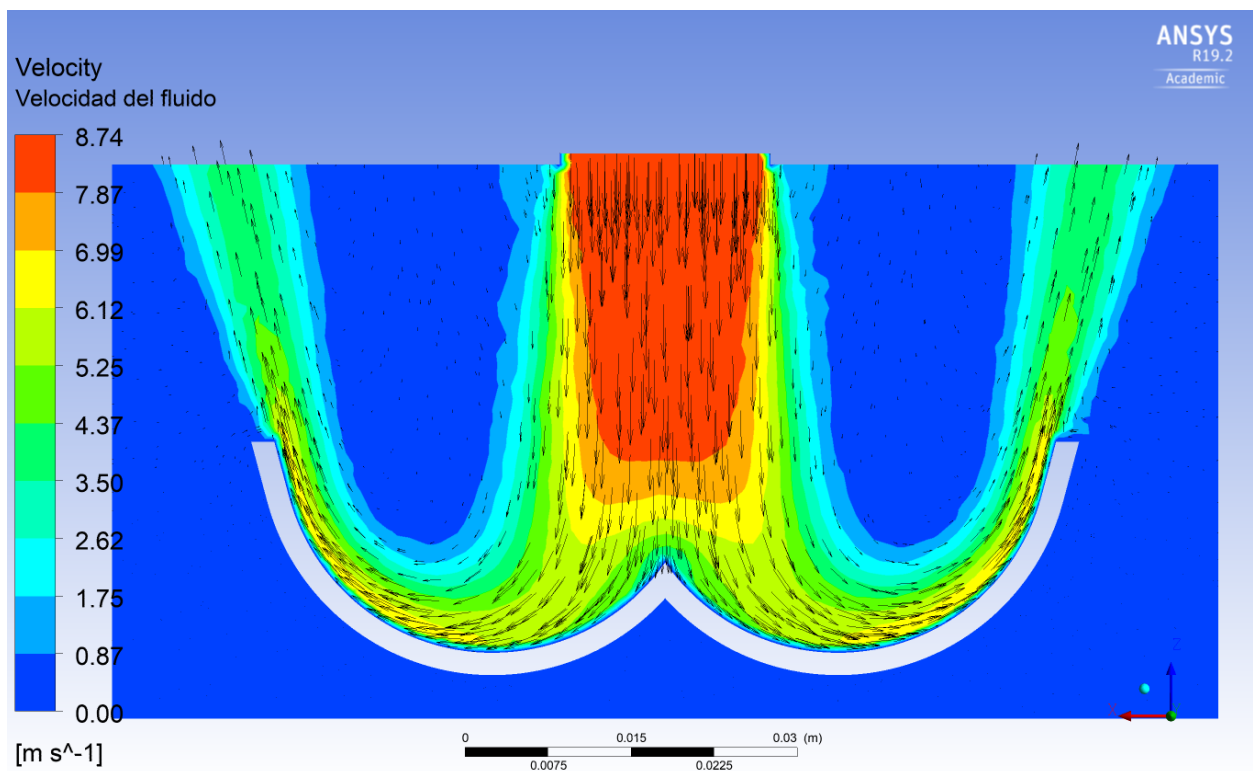


Cazoleta_1.82 d_{jet} _2.79 d_{jet} – Escenario mínimo ($\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{m}{s}$, $H_T = 4.5 m$)

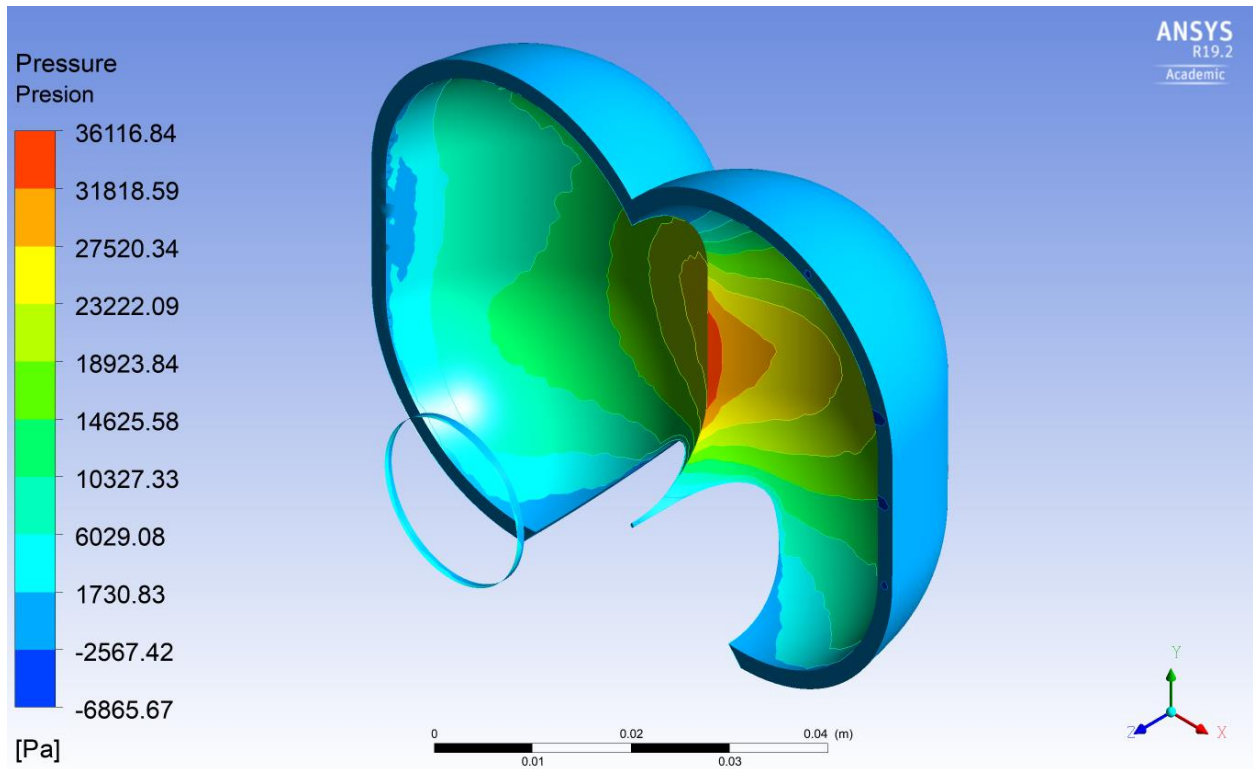
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



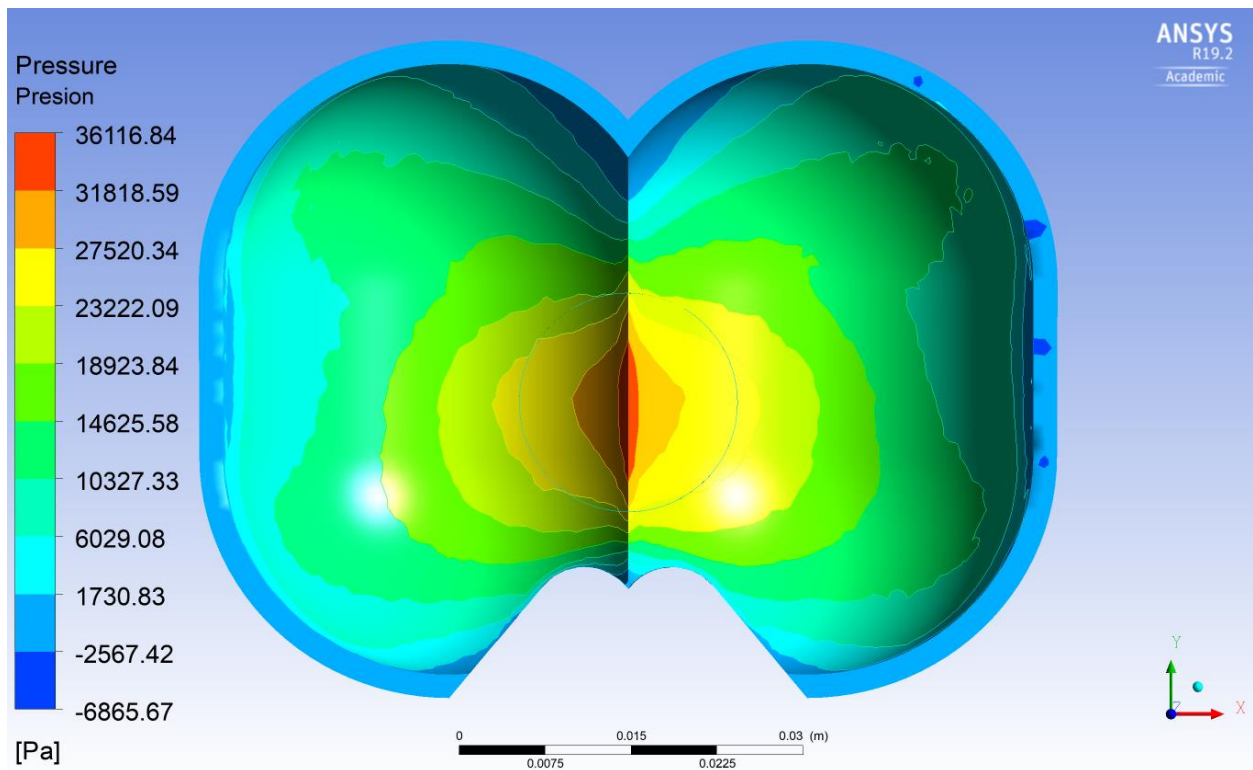
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

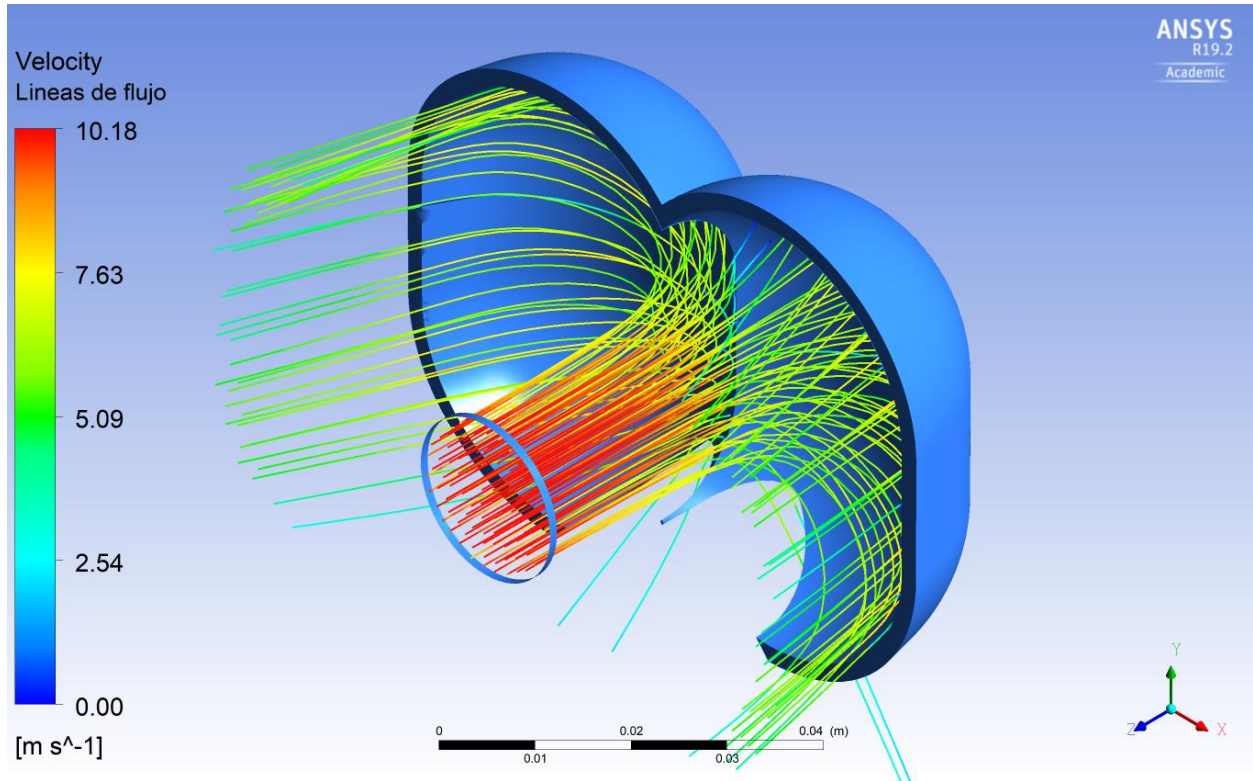


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

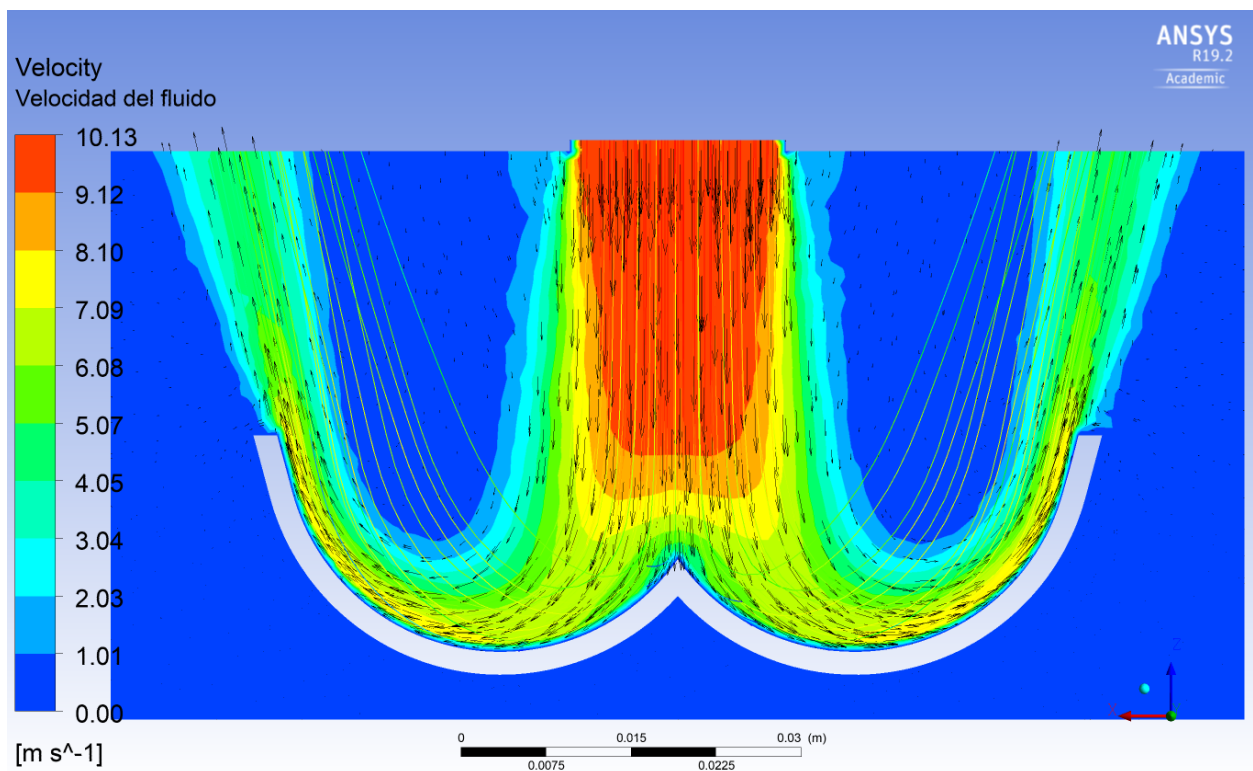


Cazoleta_1.82 $d_{jet_2.79}$ d_{jet} – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$)

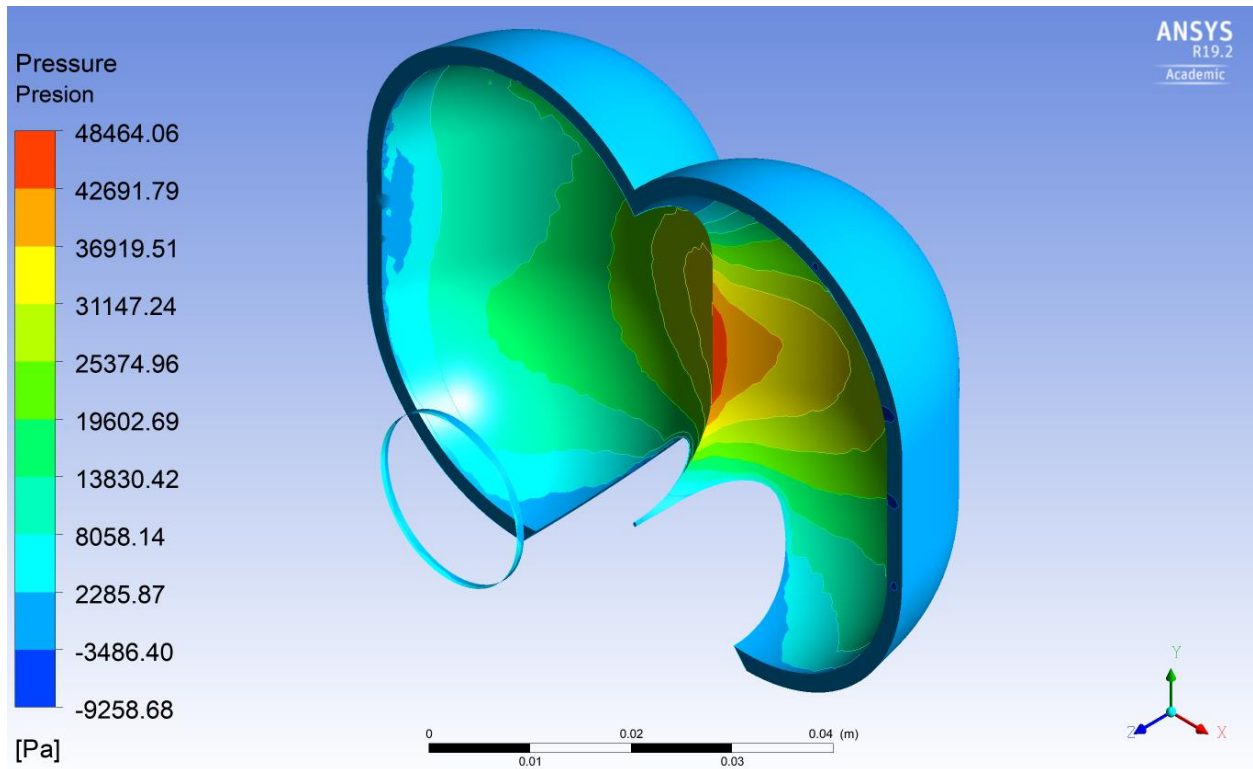
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



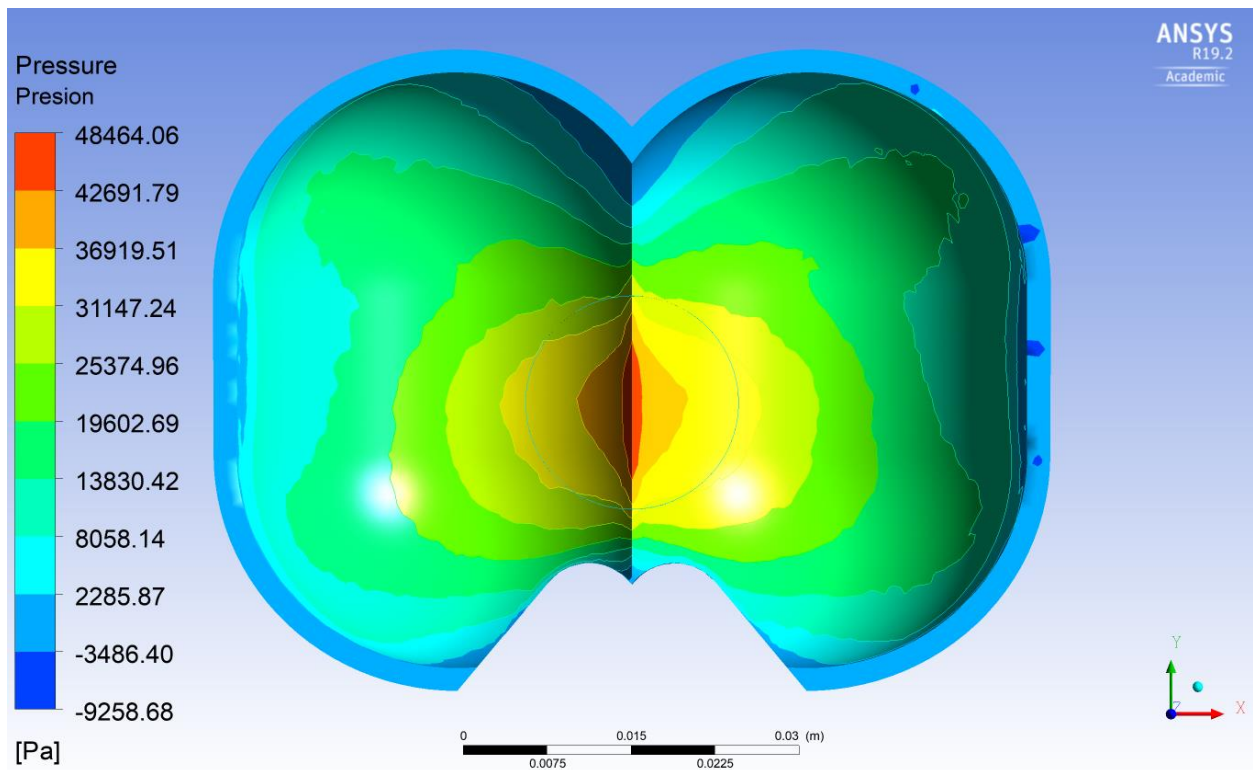
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

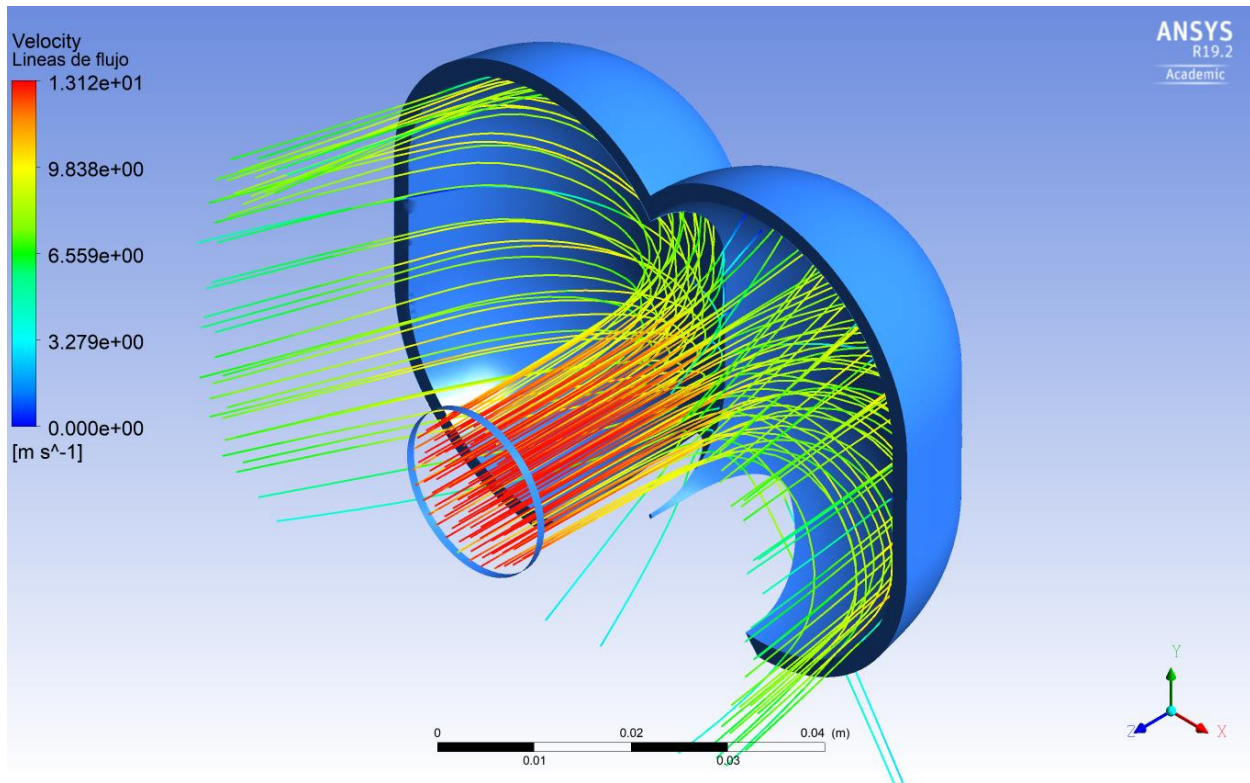


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

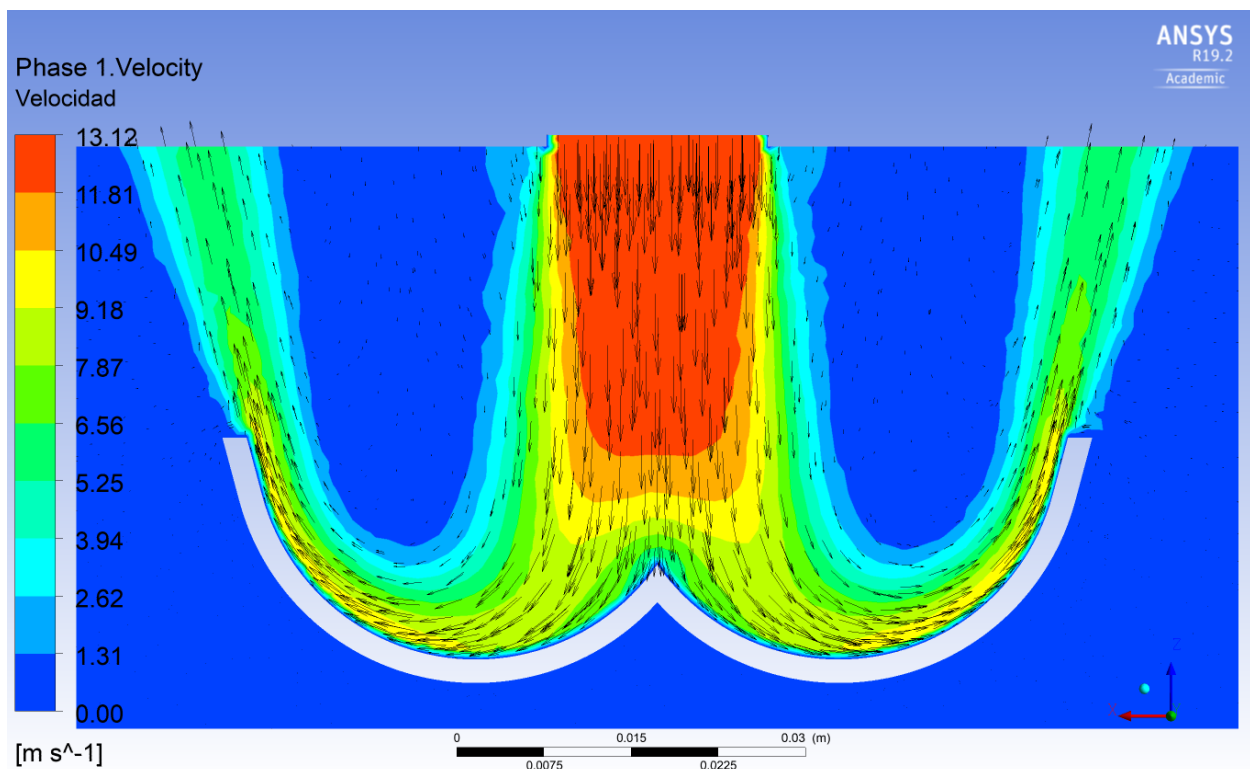


Cazoleta_1.82 d_{jet} _2.79 d_{jet} – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}, H_T = 10.0 m$)

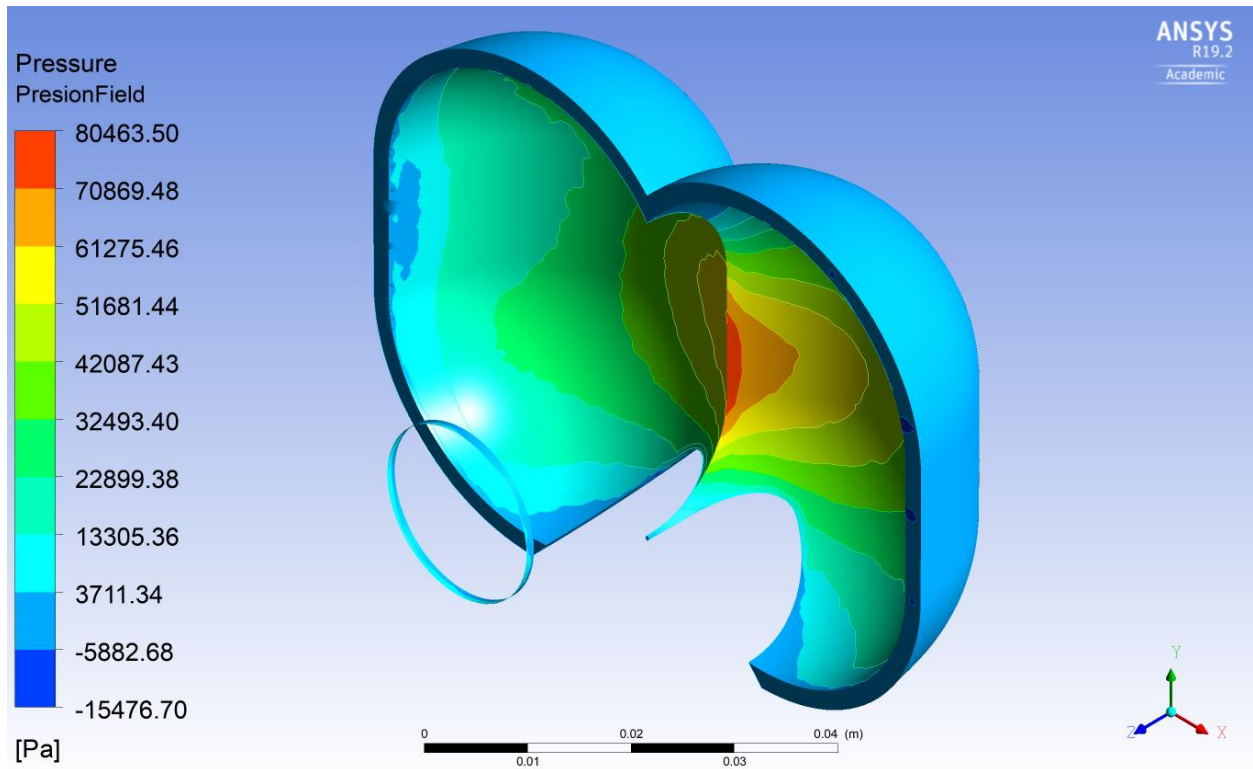
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



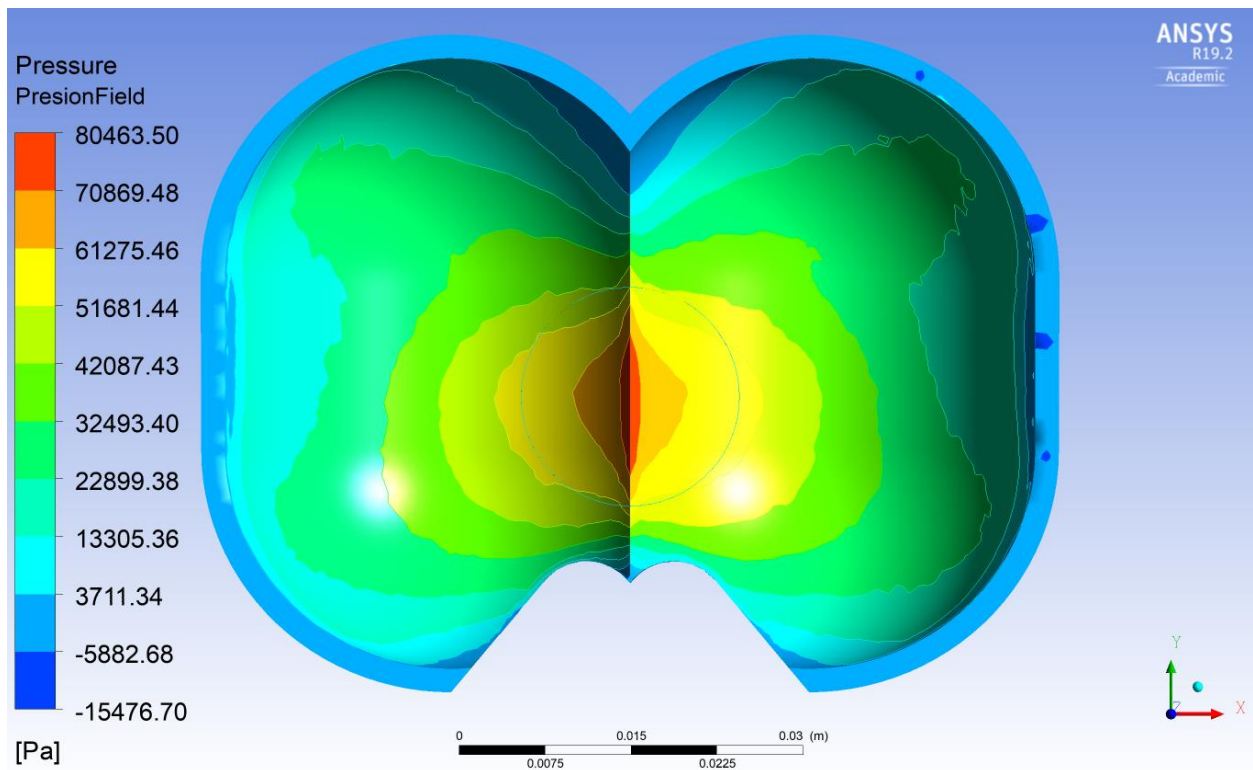
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

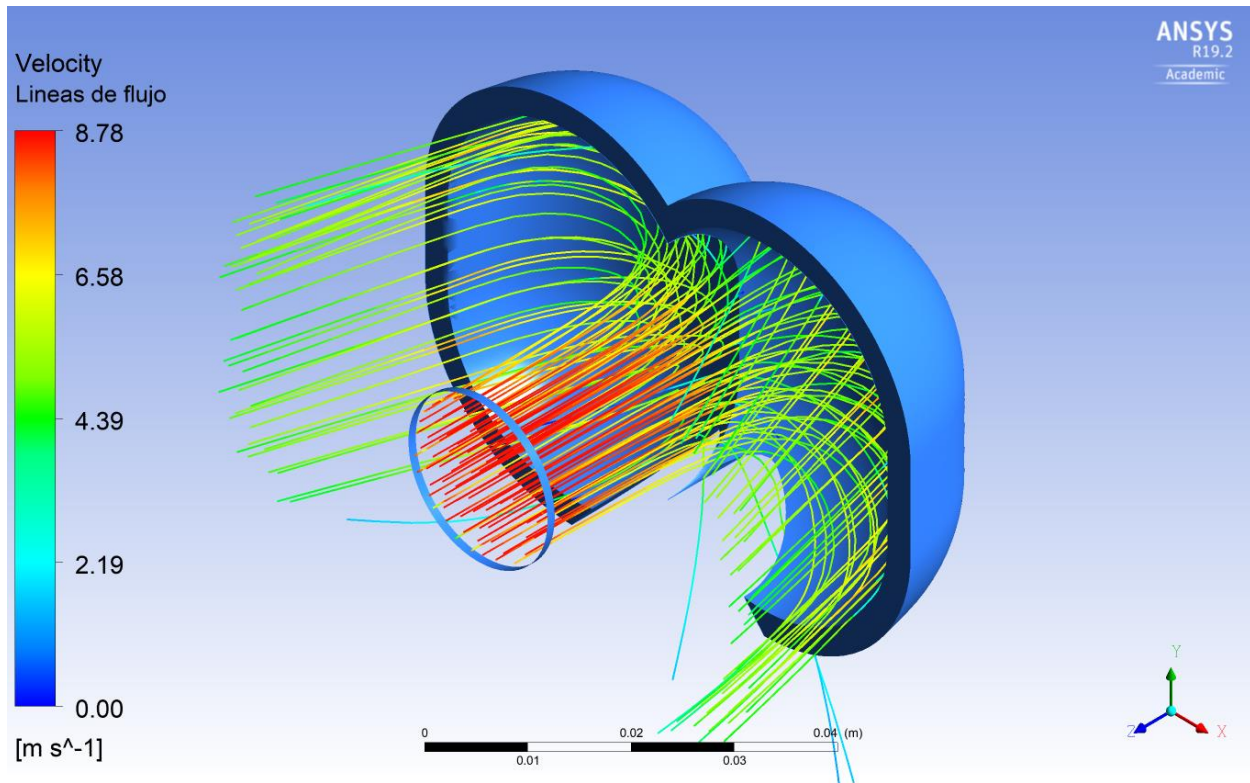


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

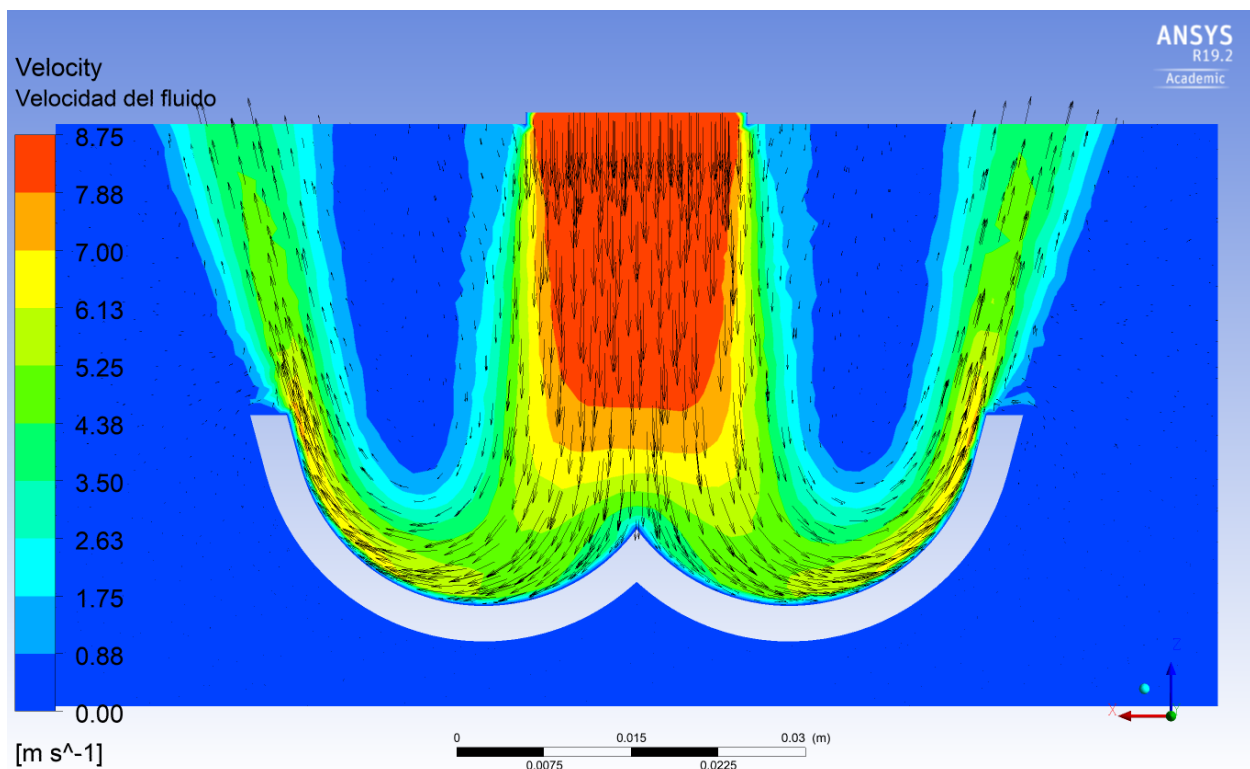


Cazoleta_1.55 d_{jet} _2.28 d_{jet} – Escenario mínimo ($\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{m}{s}$, $H_T = 4.5 m$)

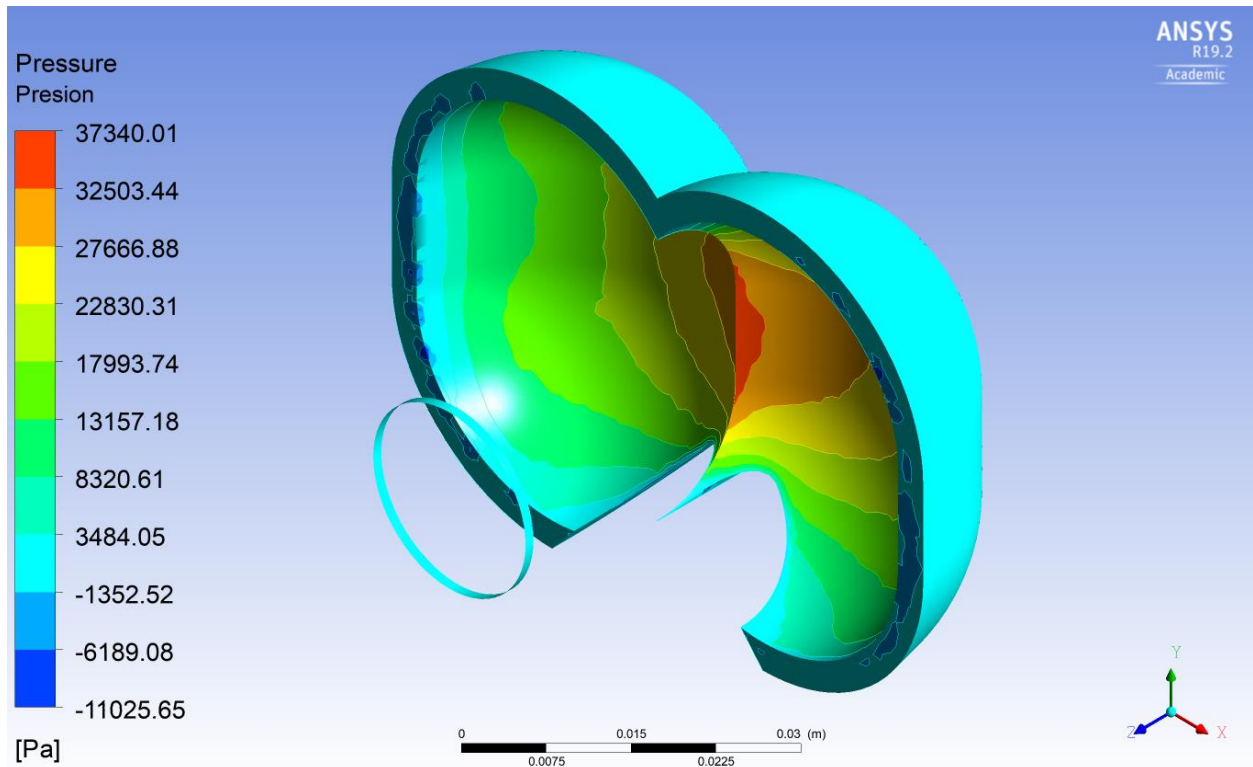
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



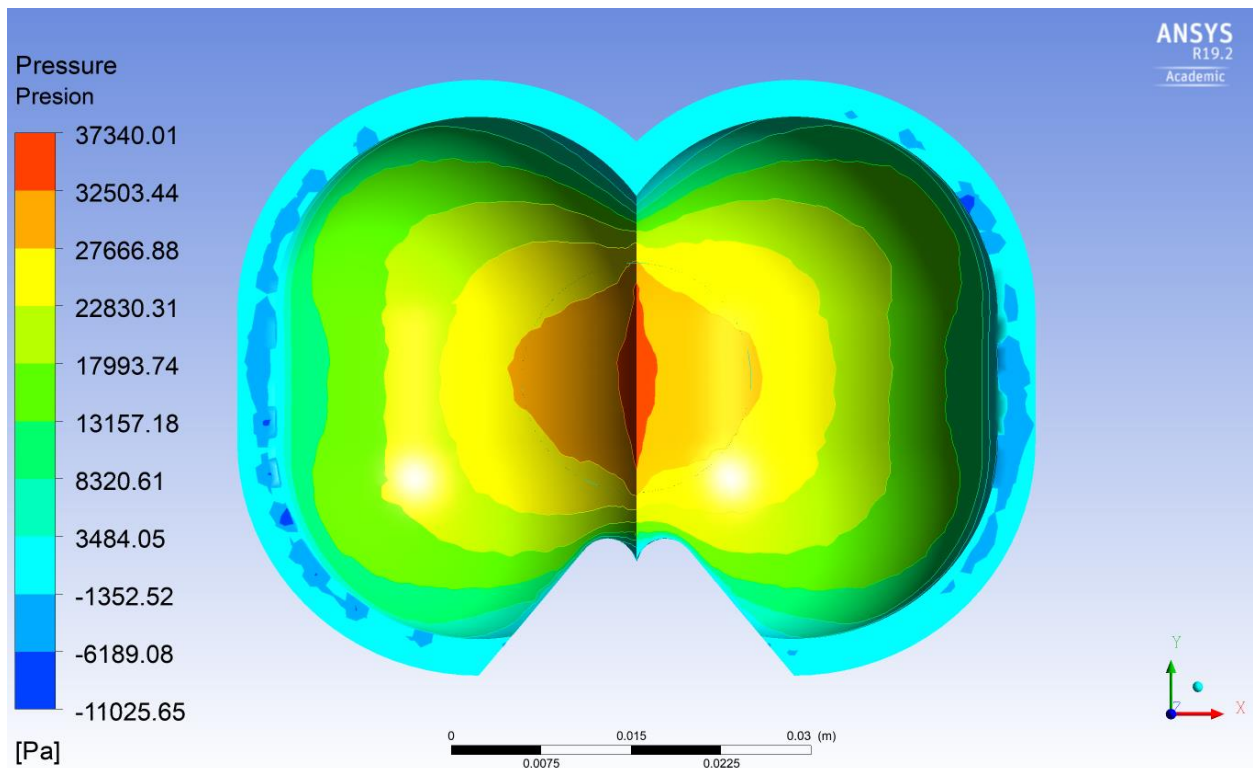
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

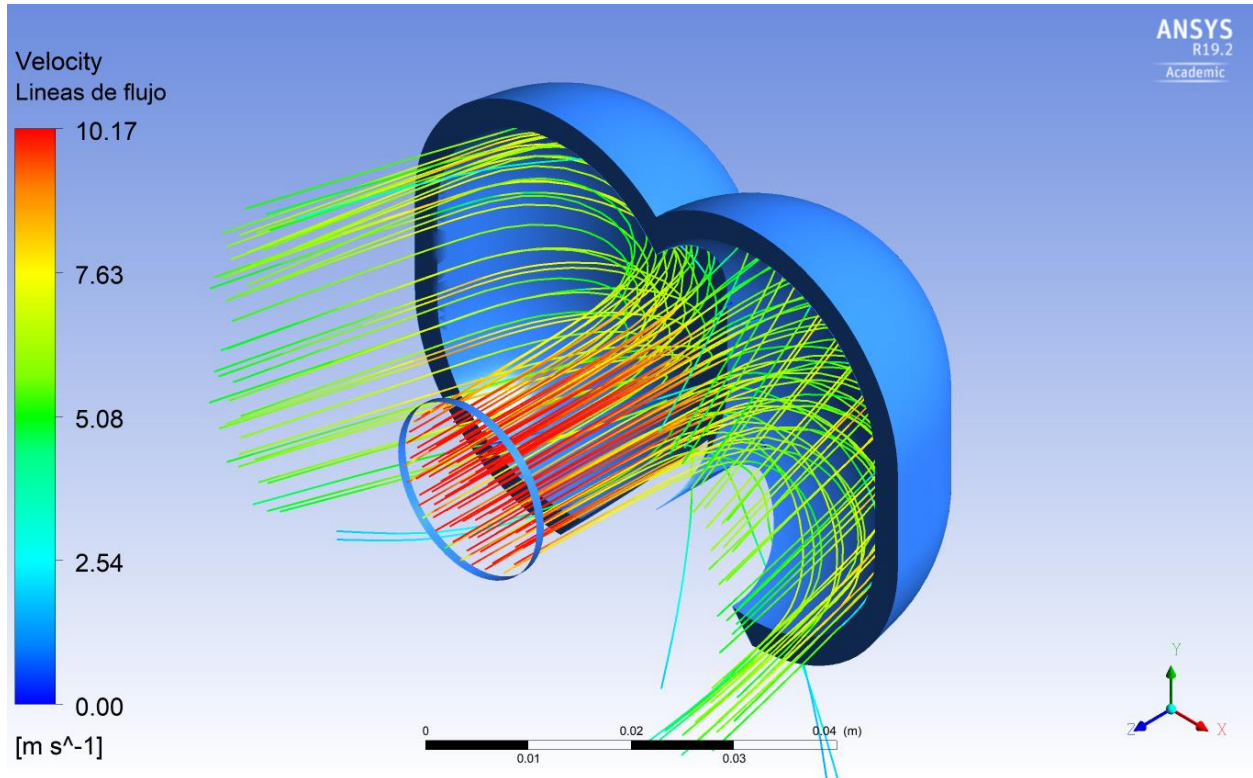


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

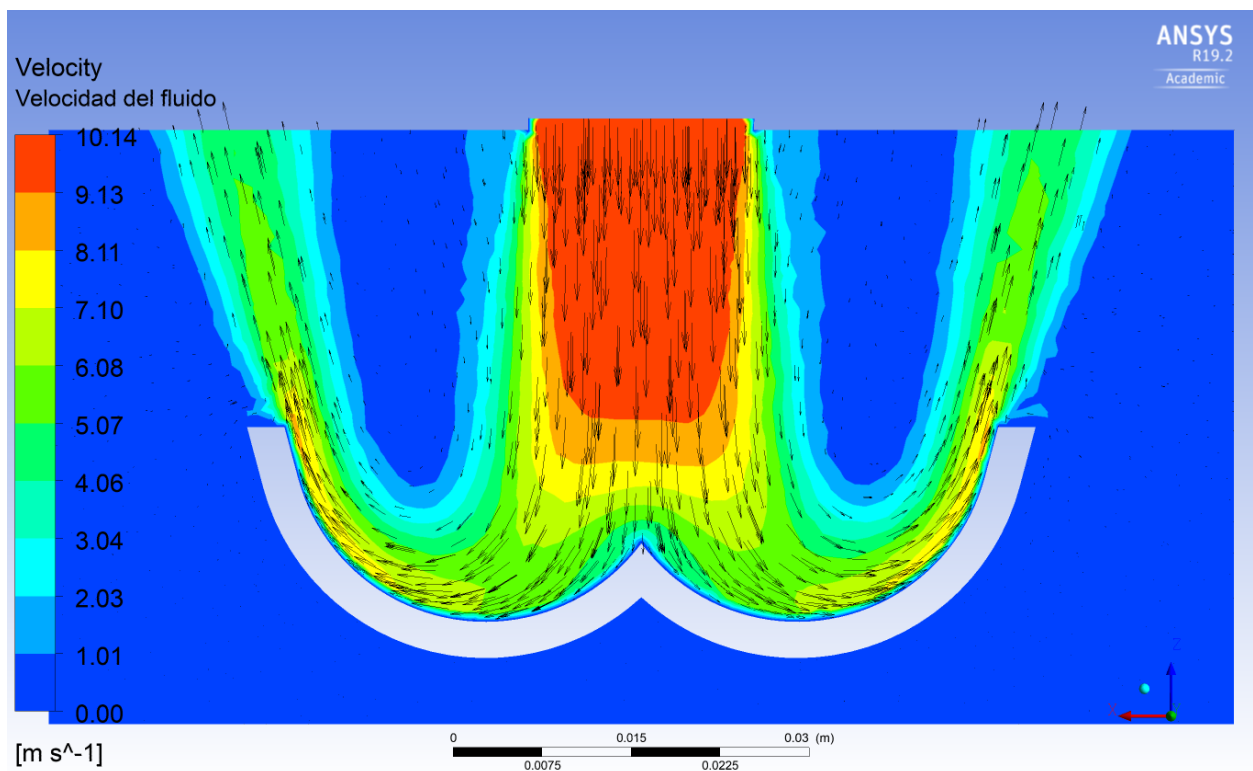


Cazoleta_1.55 $d_{jet_2.28 d_{jet}}$ – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}, H_T = 6.0 m$)

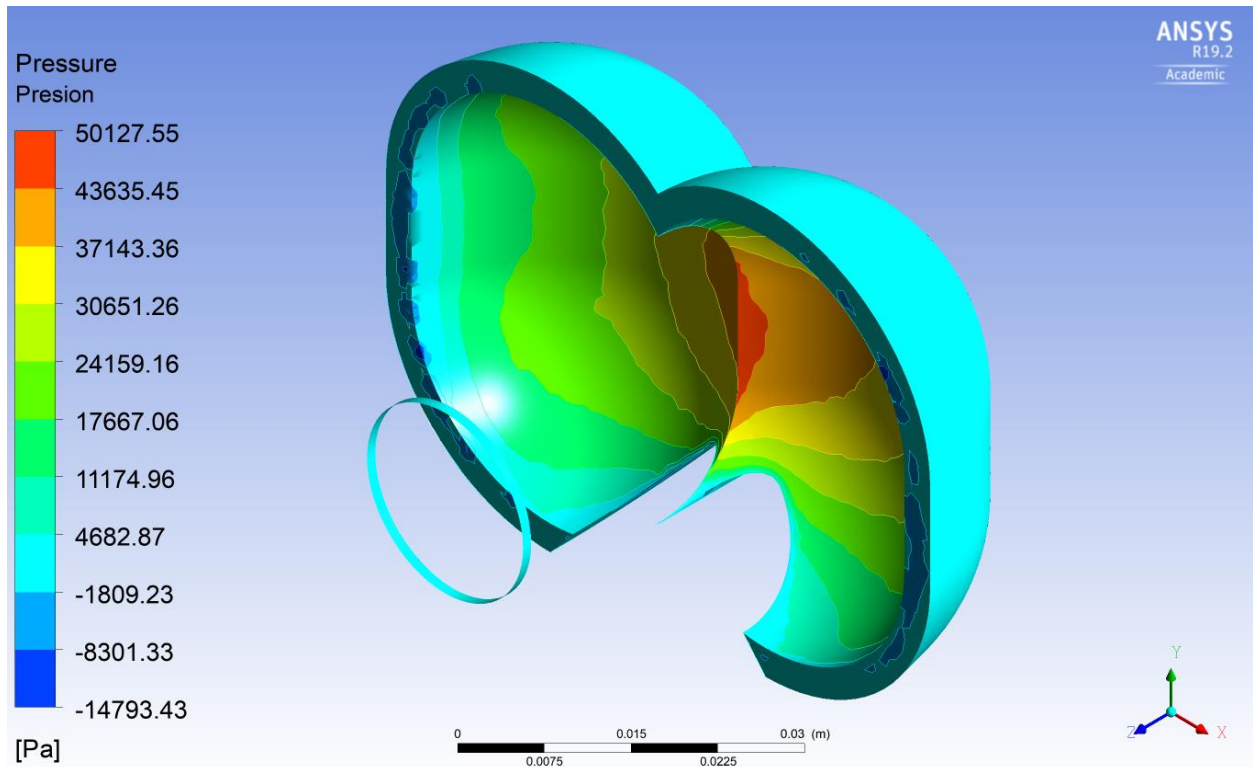
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



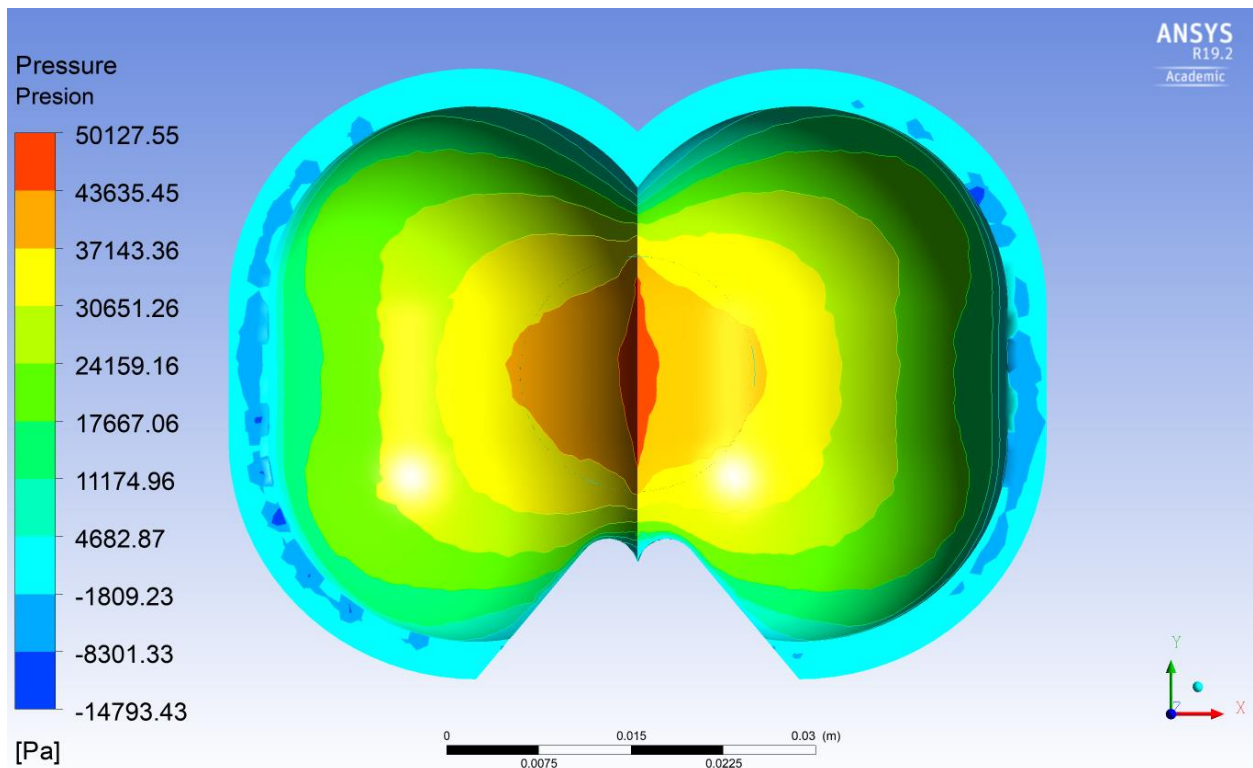
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

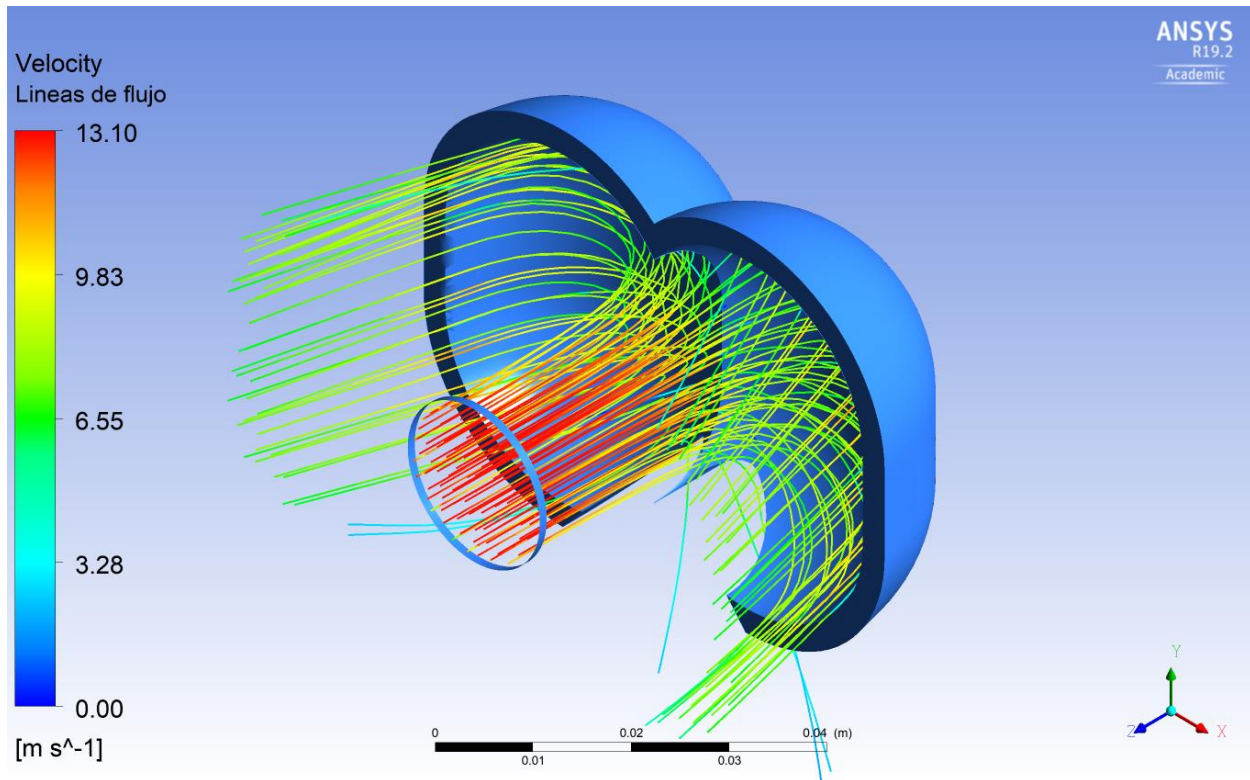


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

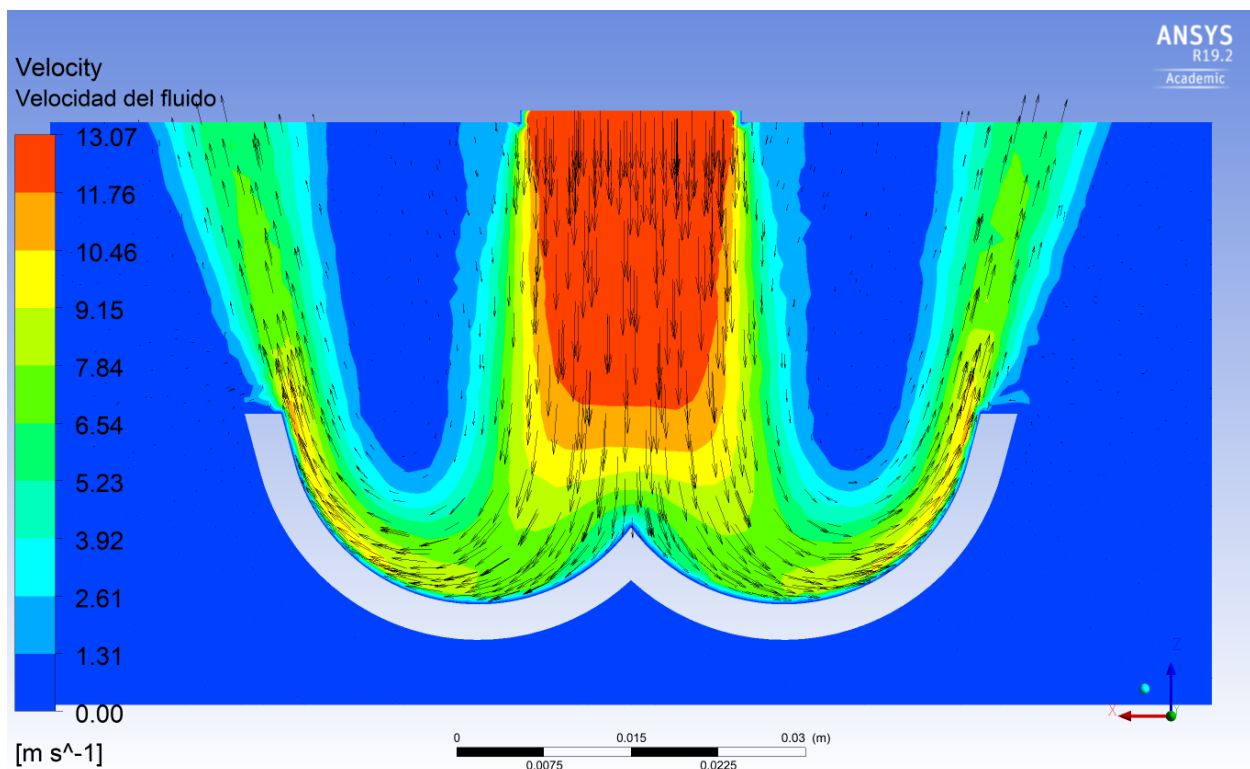


Cazoleta_1.55 d_{jet} _2.28 d_{jet} – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}$, $H_T = 10.0 m$)

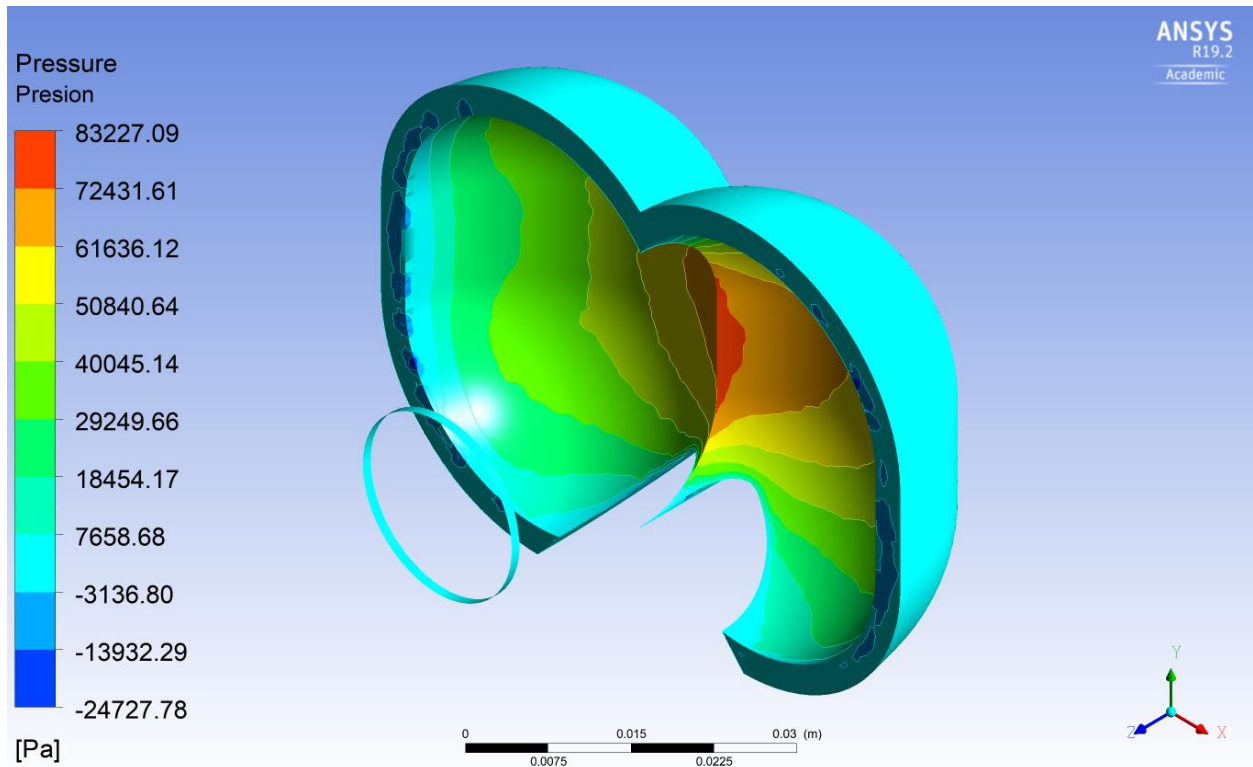
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



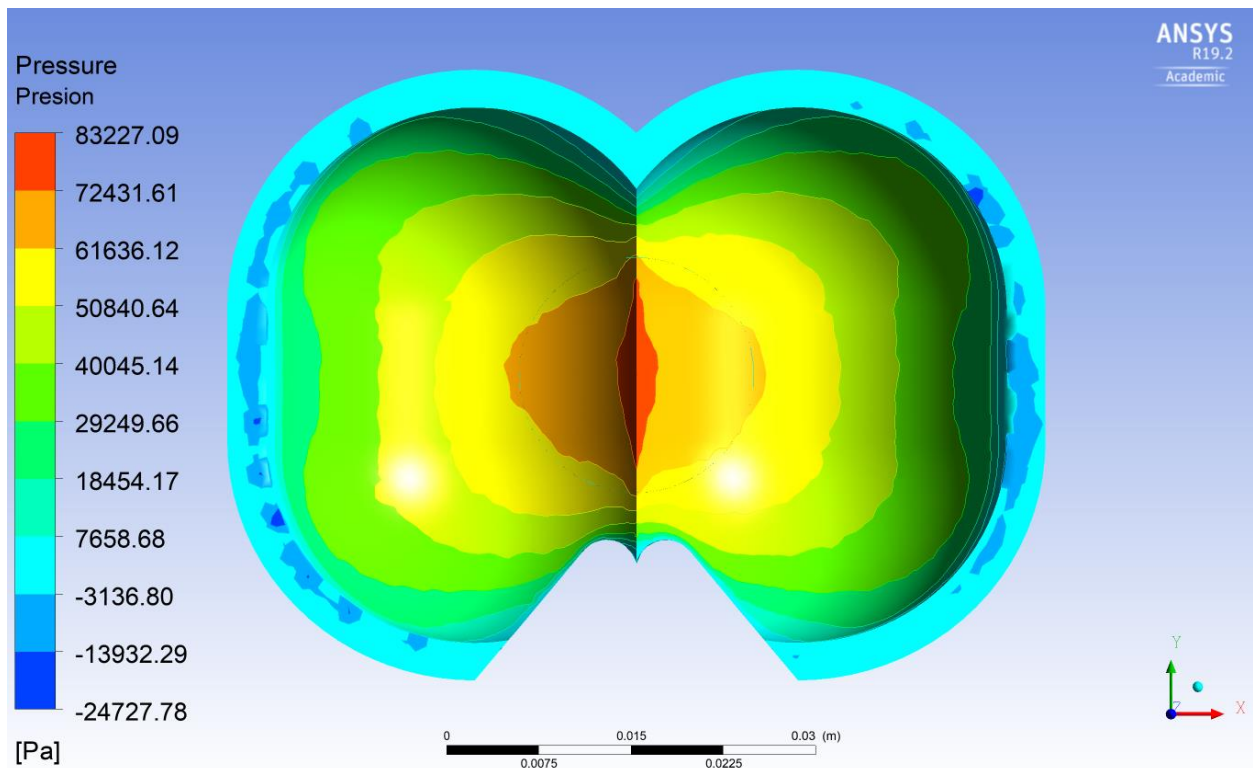
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

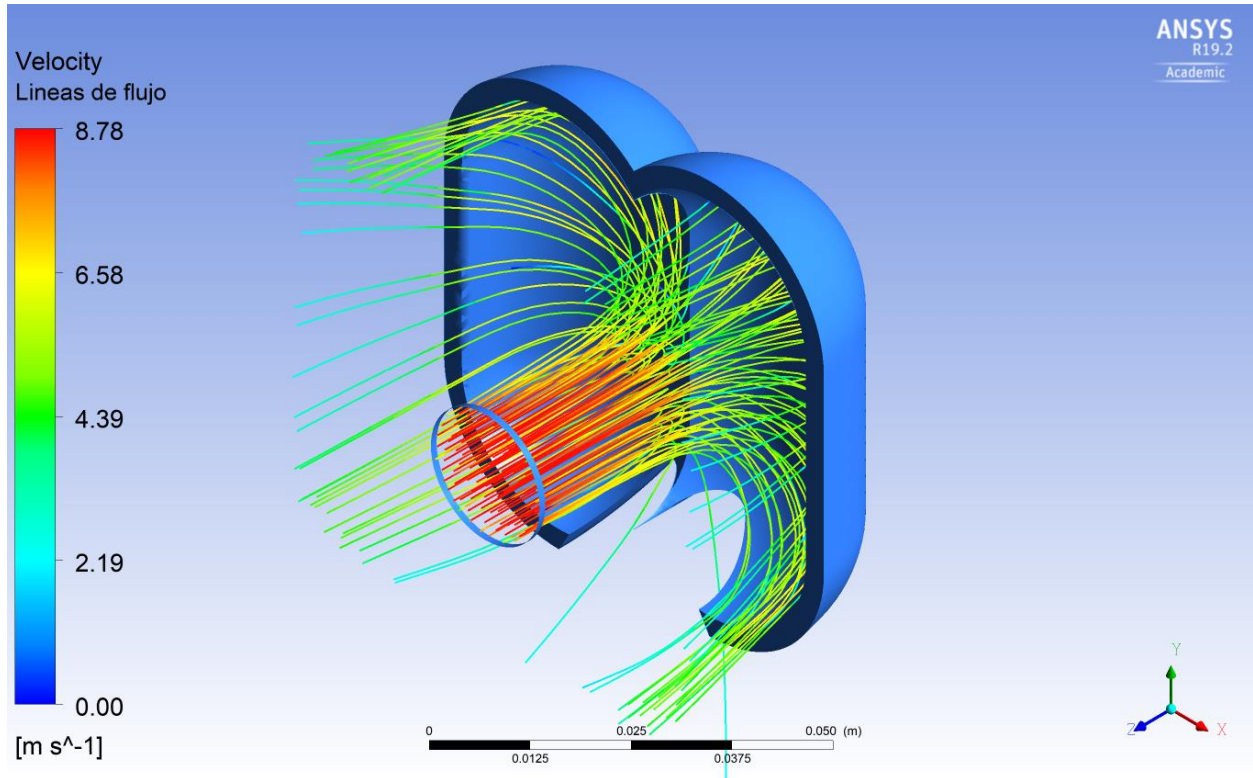


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

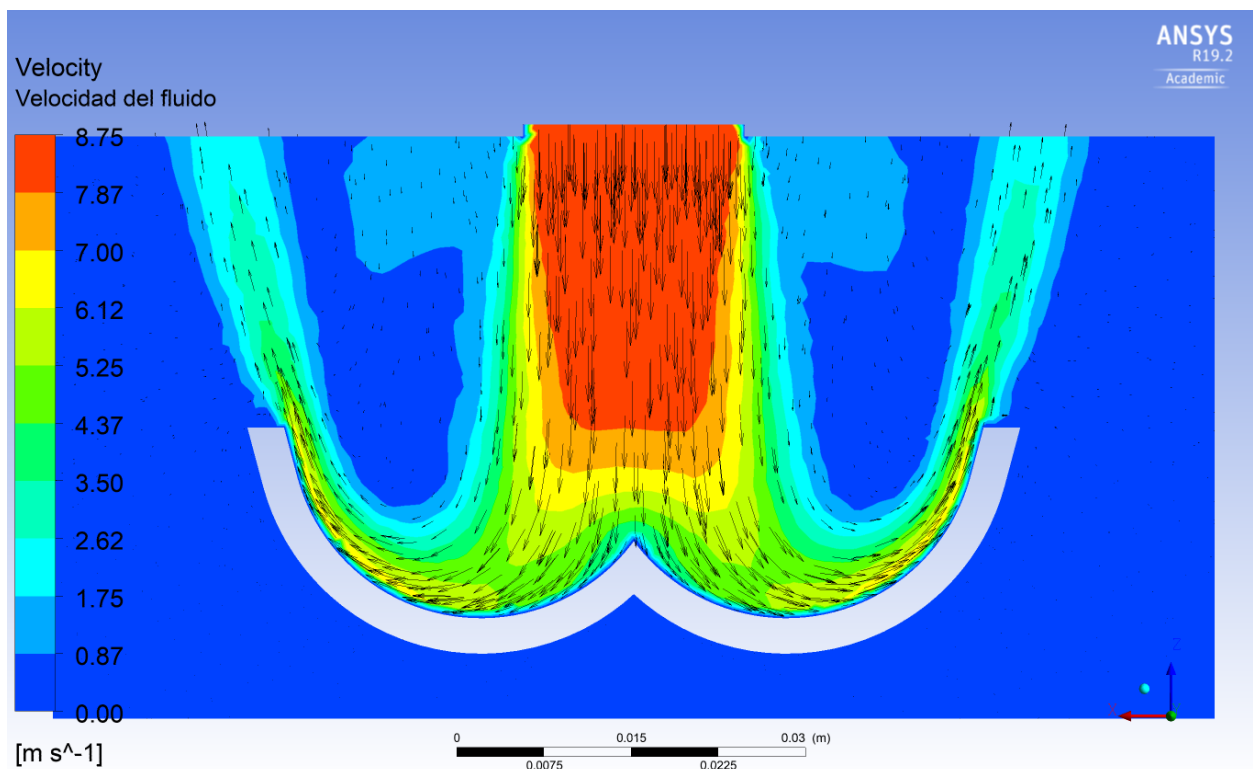


Cazoleta_1.55 d_{jet} _3.30 d_{jet} – Escenario mínimo ($\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{m}{s}$, $H_T = 4.5 m$)

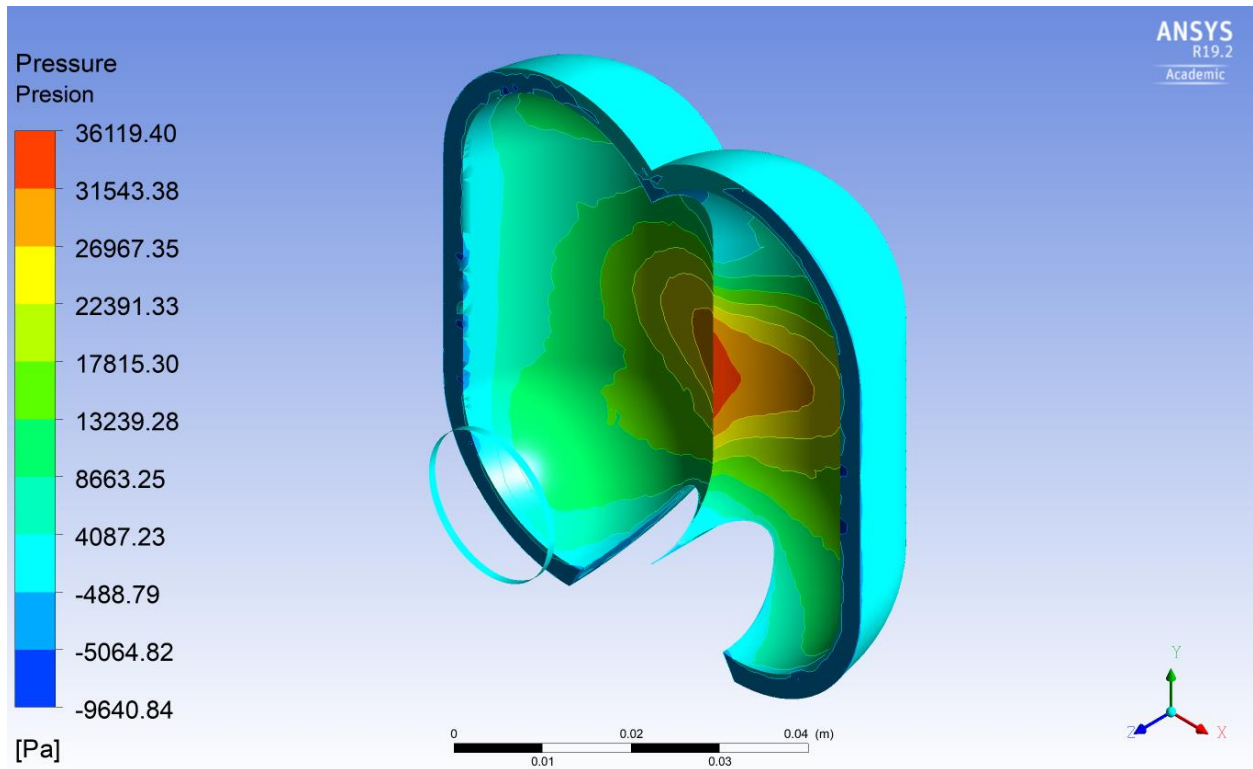
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



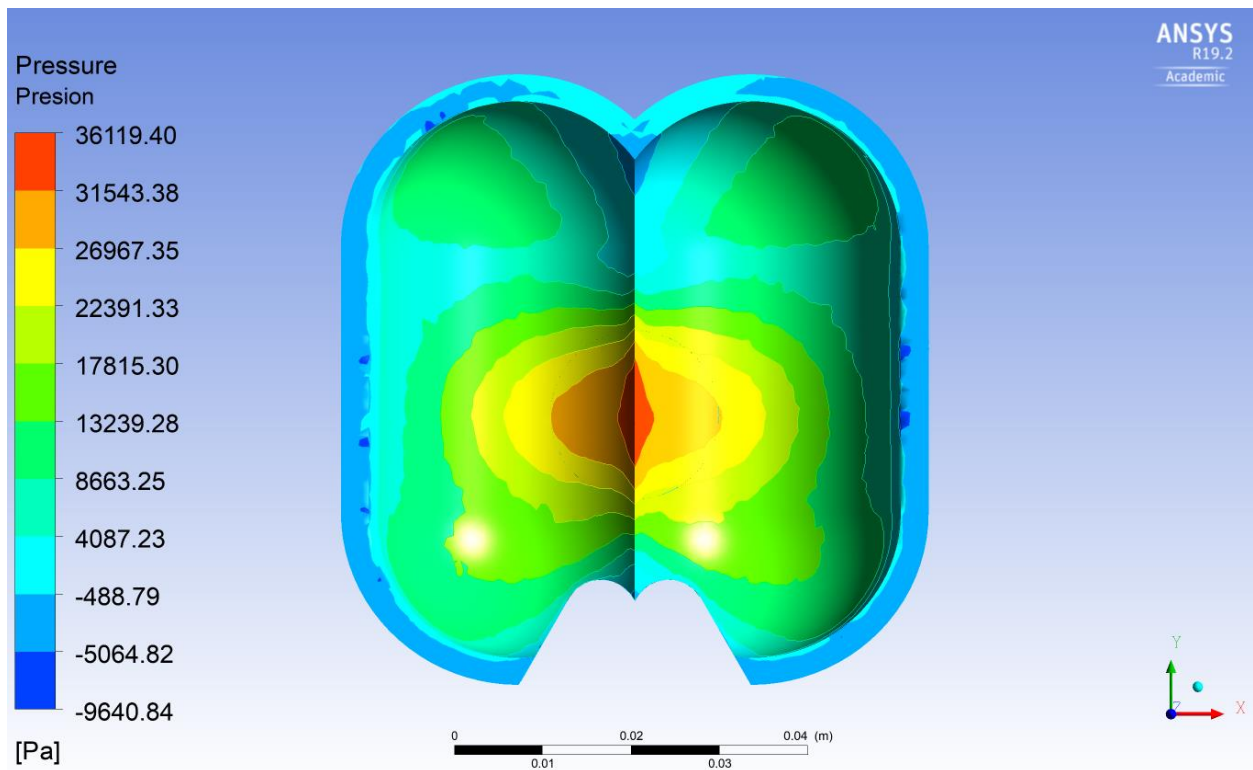
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

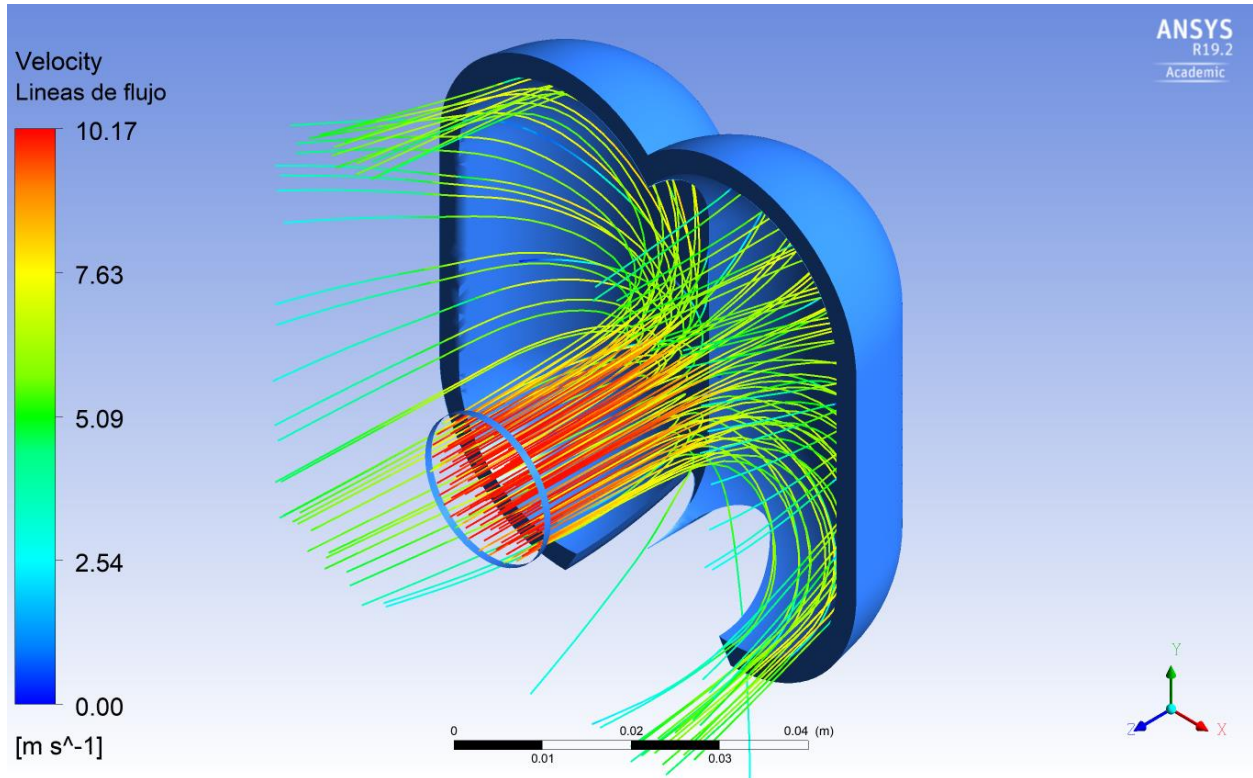


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

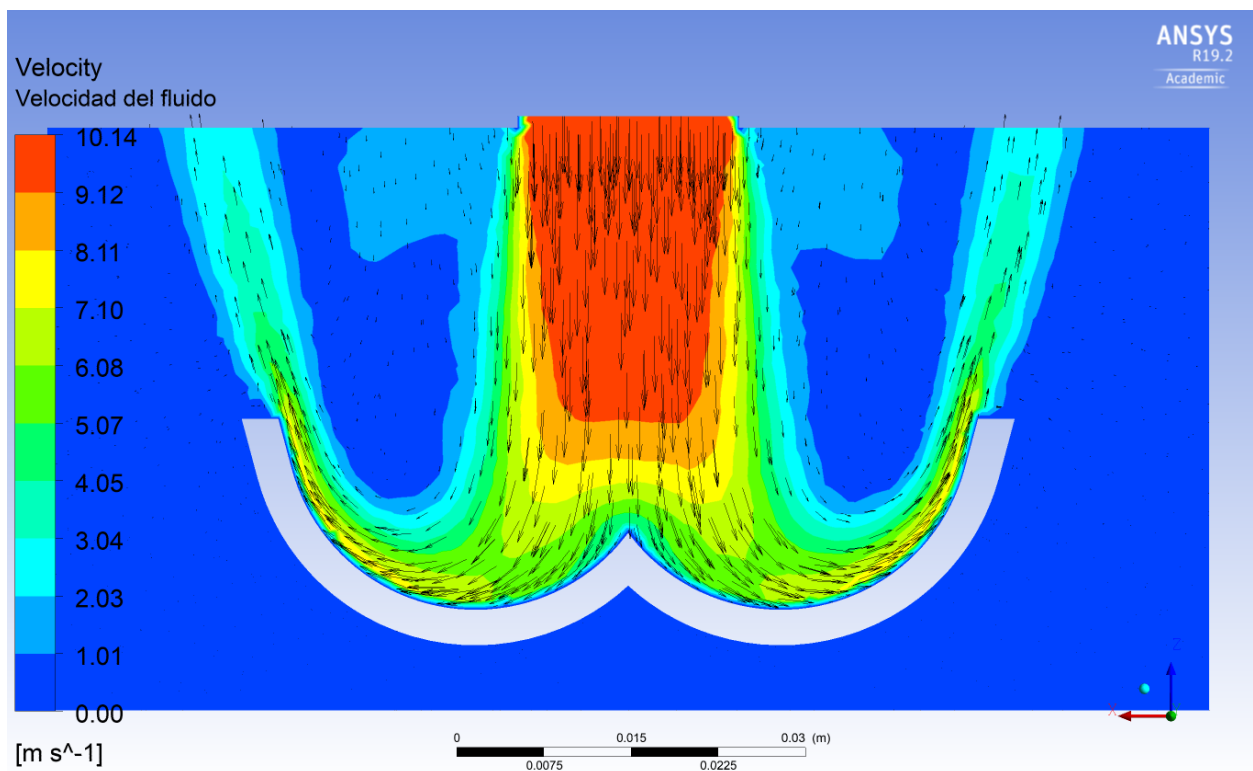


Cazoleta_1.55 d_{jet} _3.30 d_{jet} – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$)

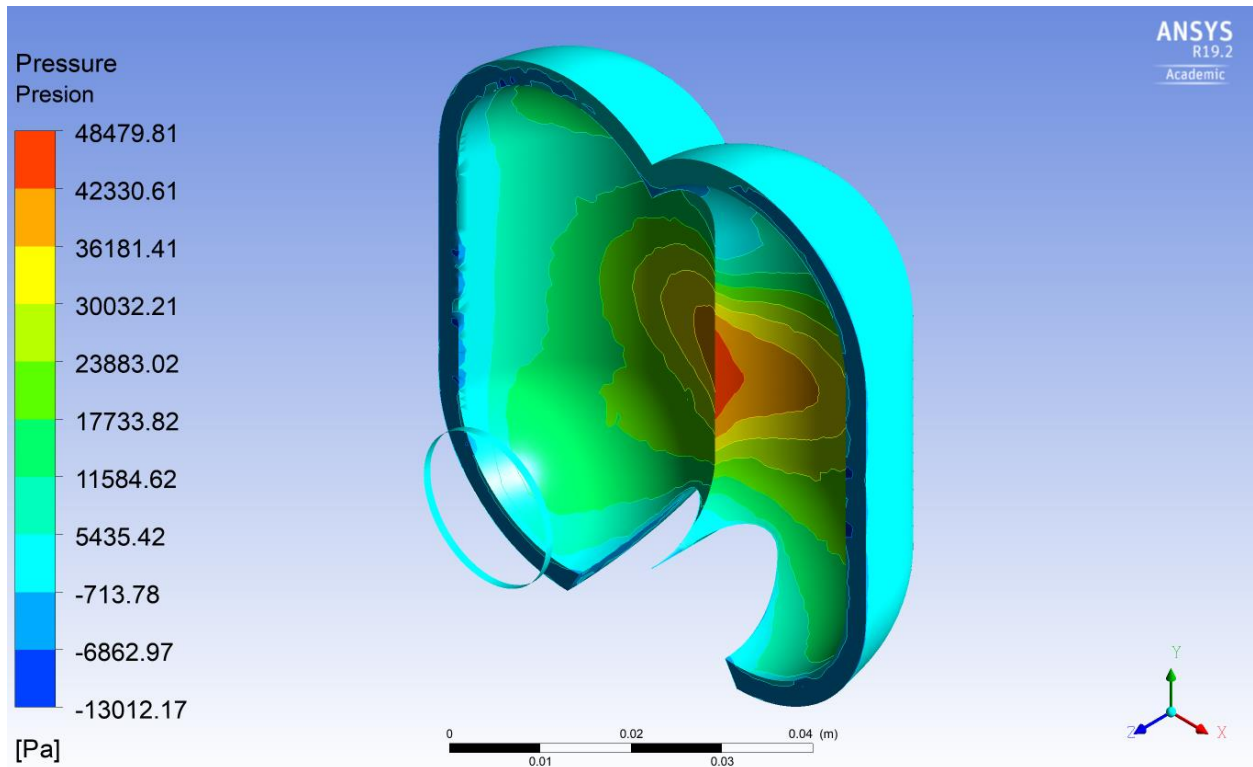
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



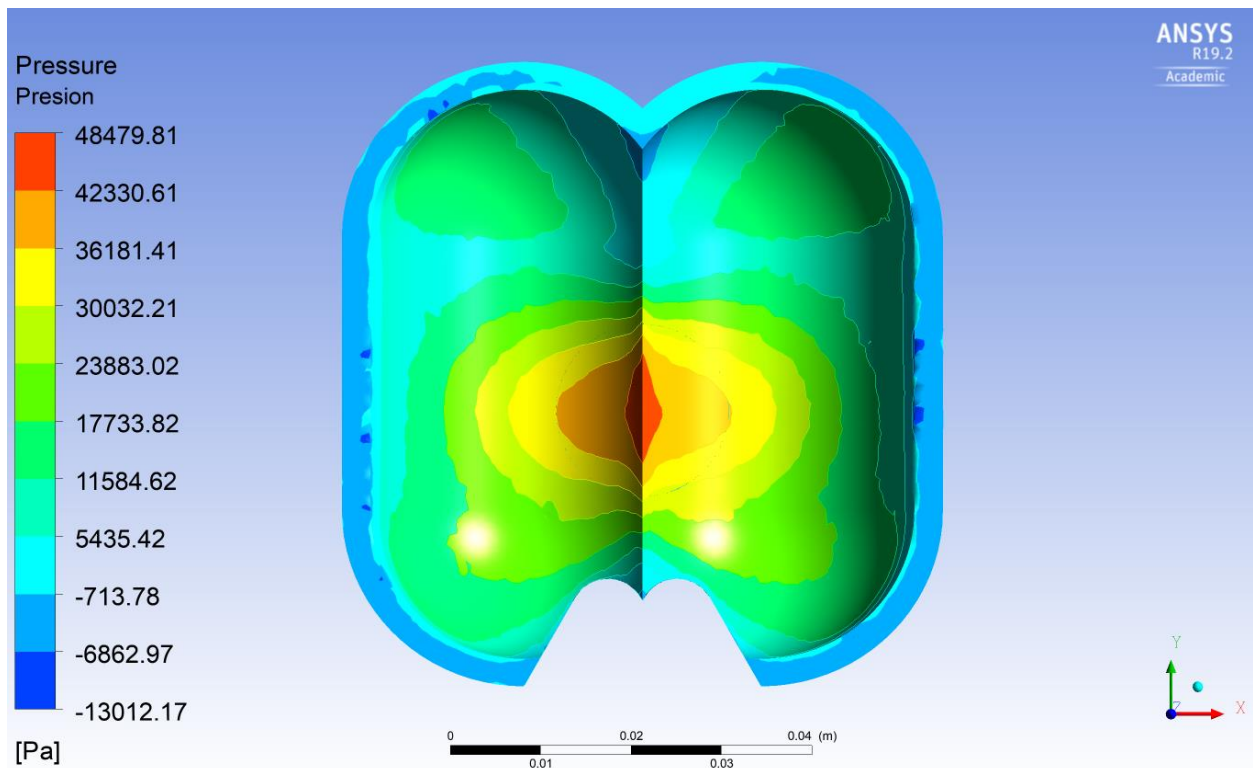
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

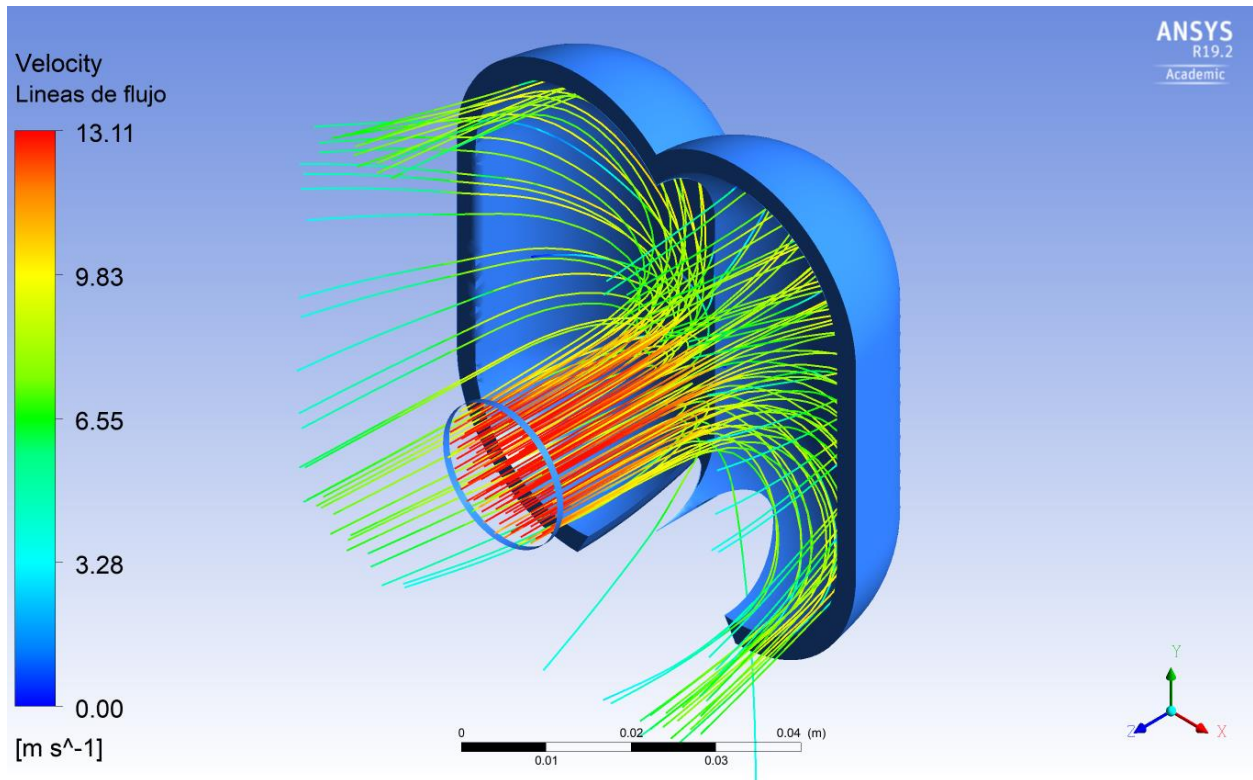


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

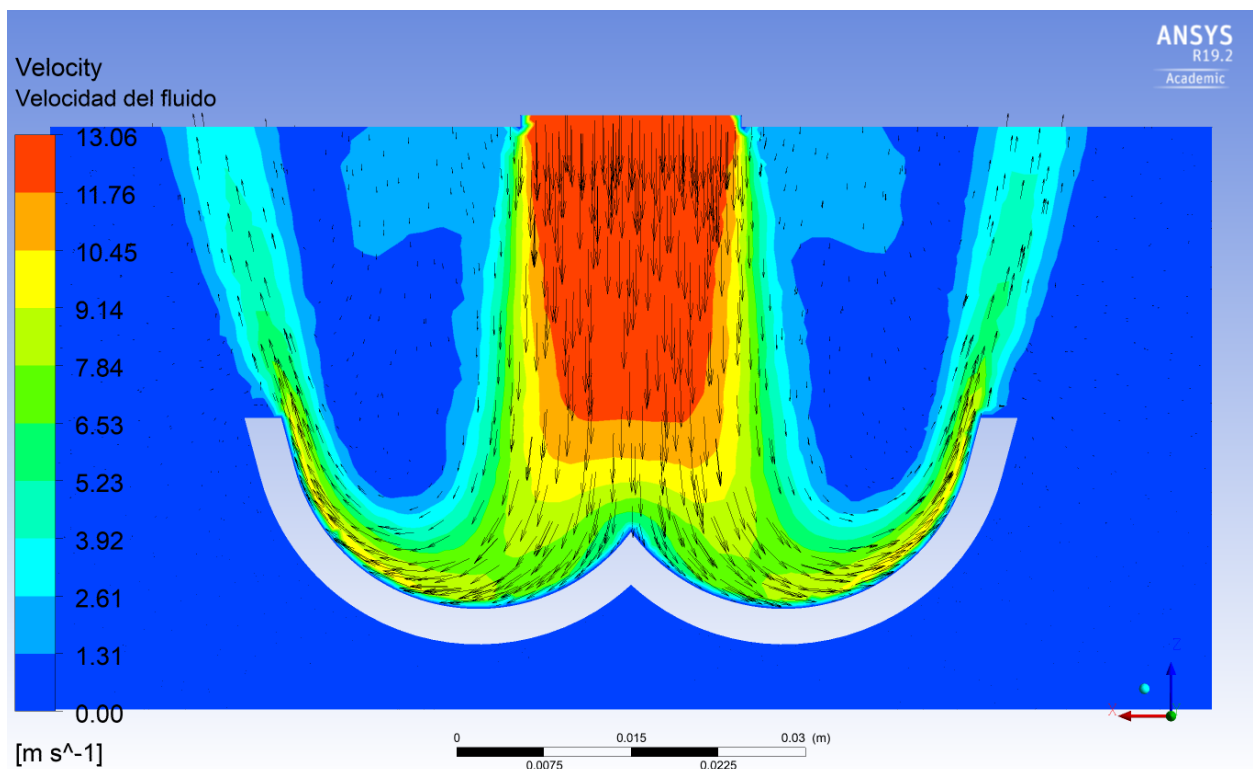


Cazoleta_1.55 d_{jet} _3.30 d_{jet} – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}$, $H_T = 10.0 m$)

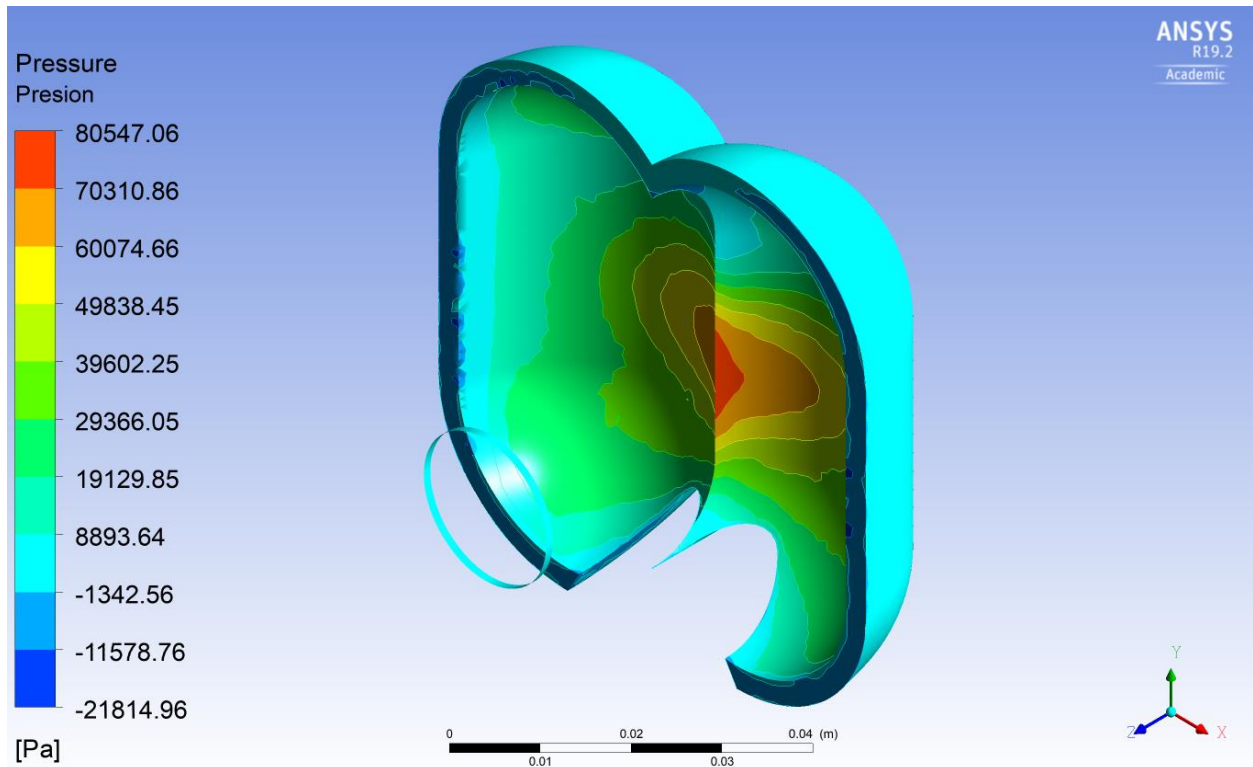
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



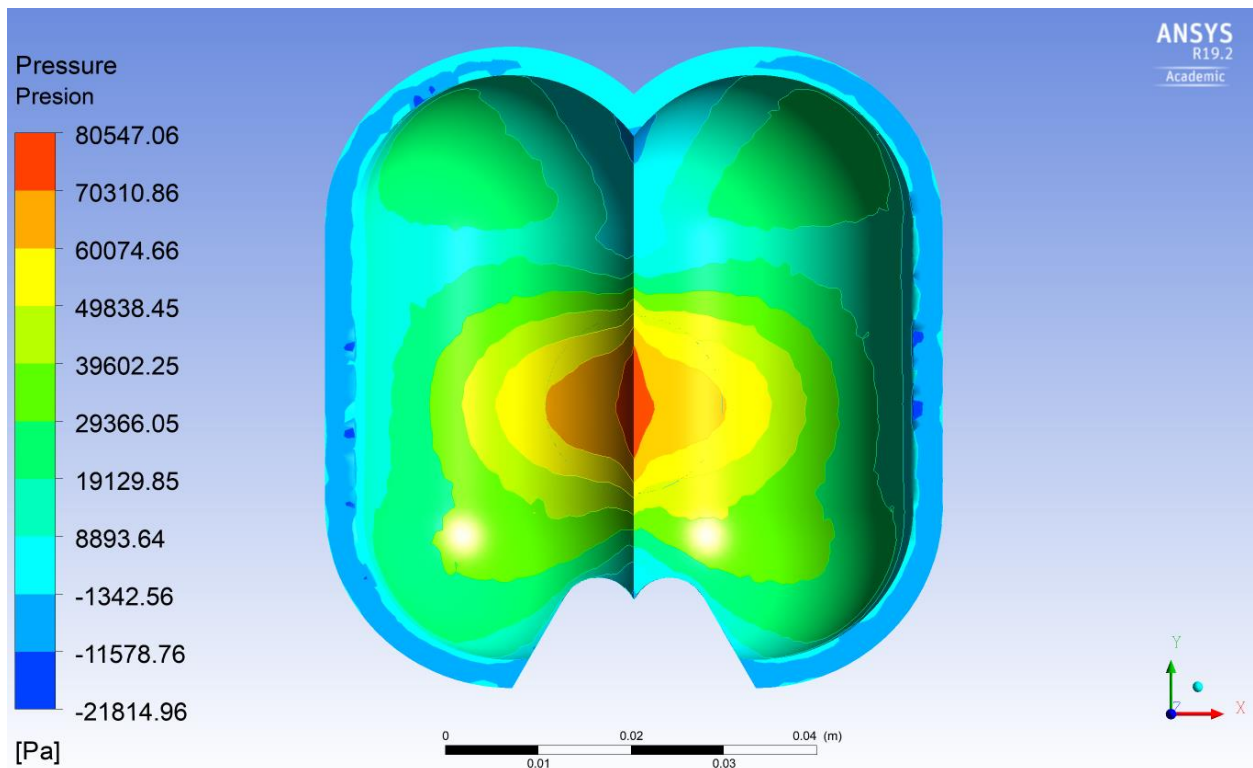
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

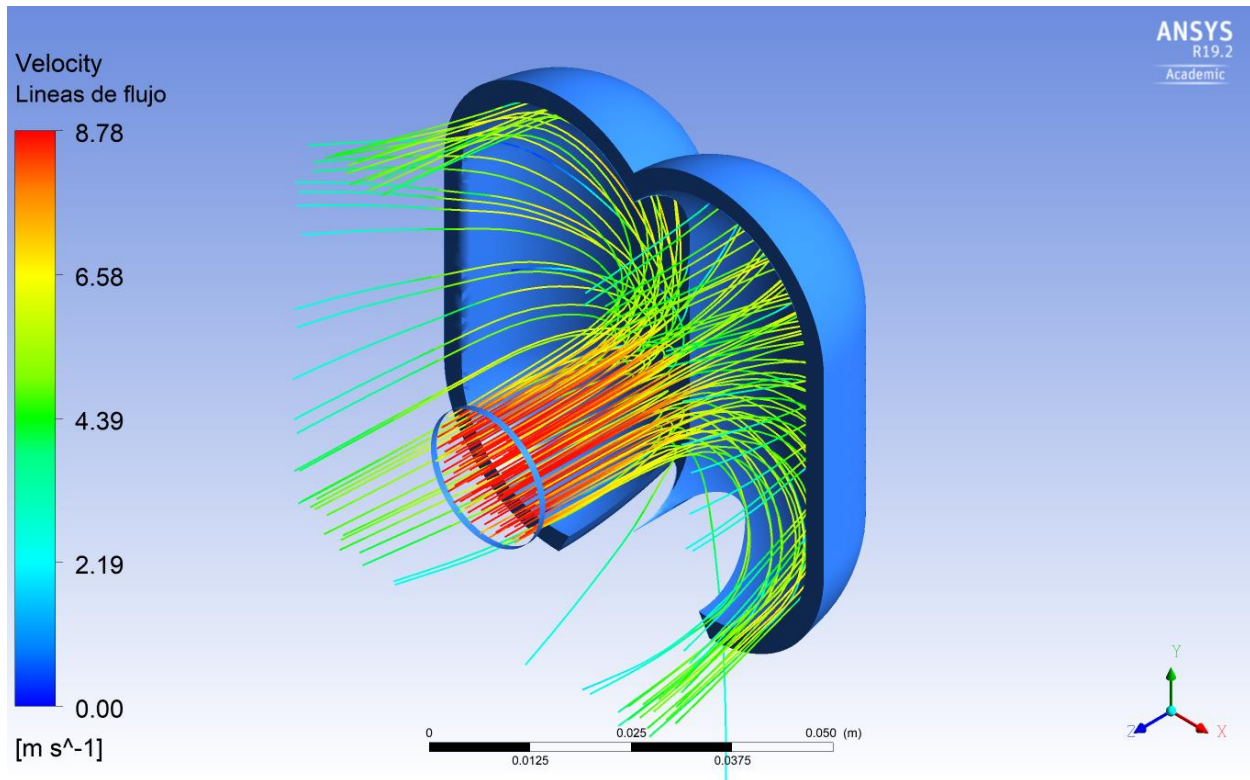


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

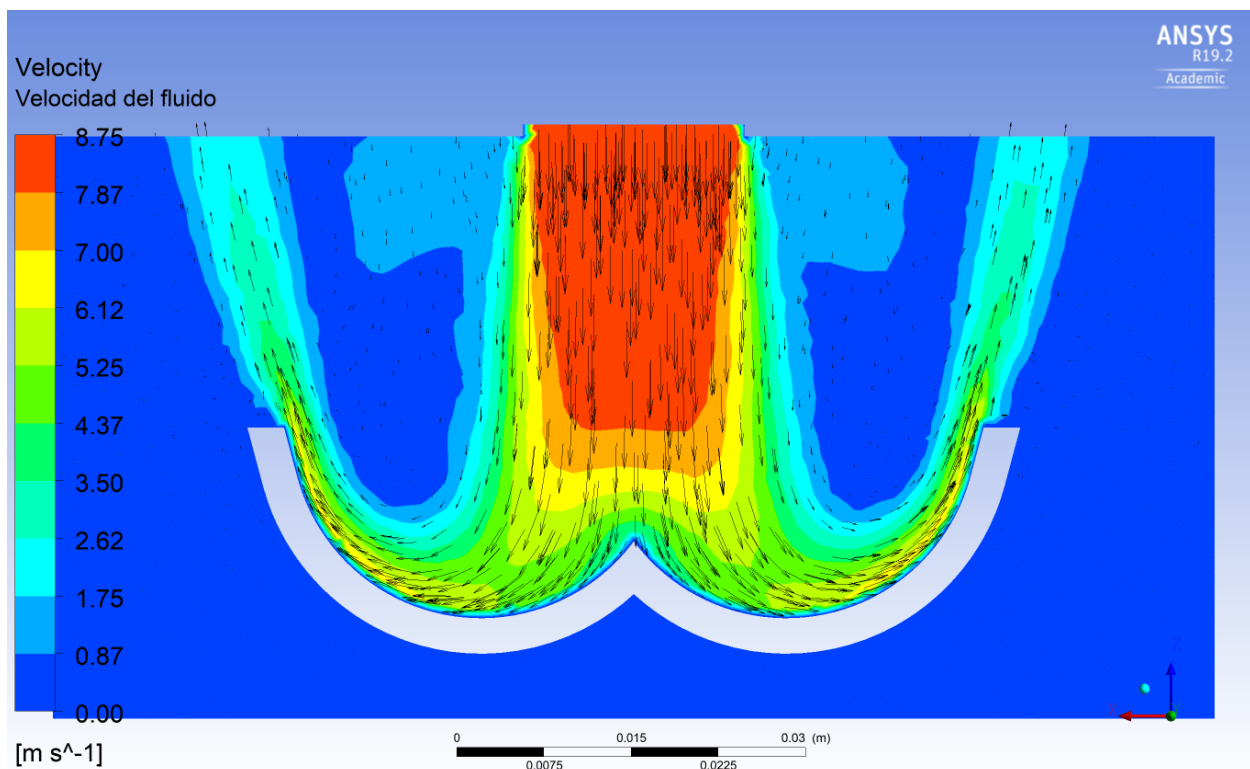


Cazoleta_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} – Escenario mínimo ($\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{m}{s}$, $H_T = 4.5 m$)

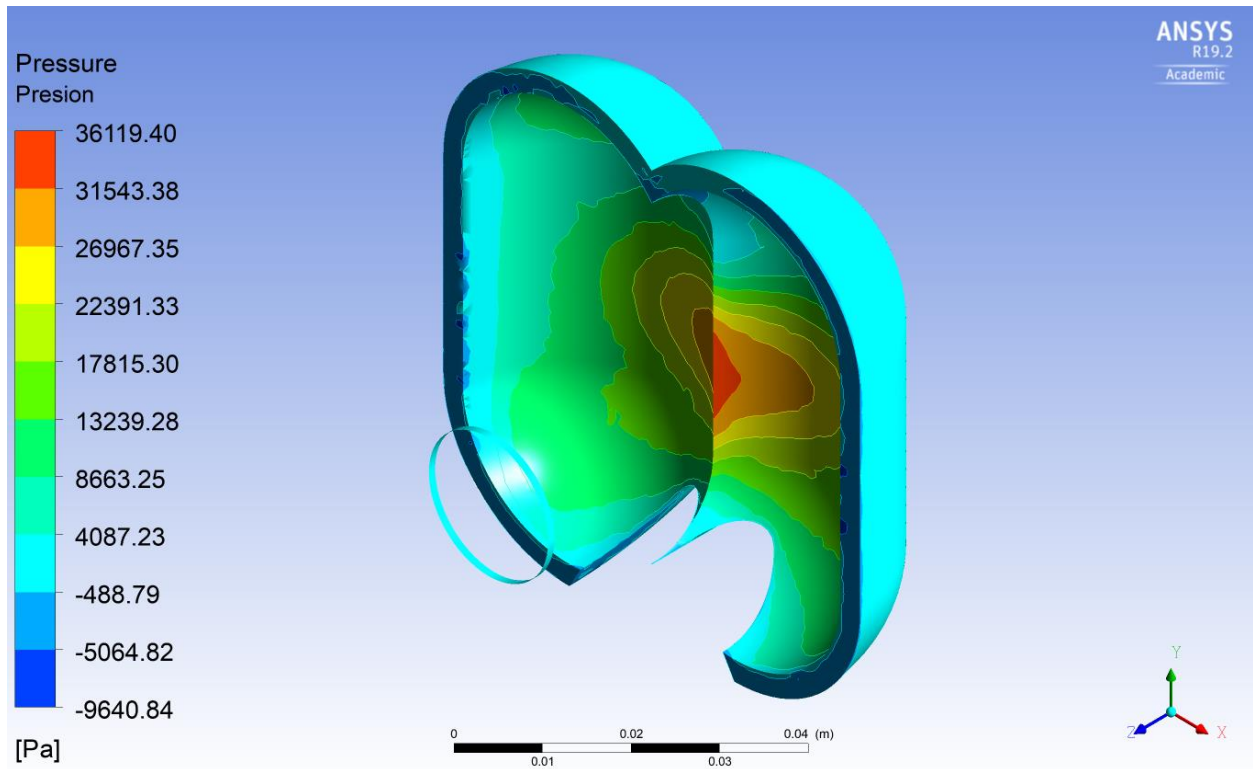
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



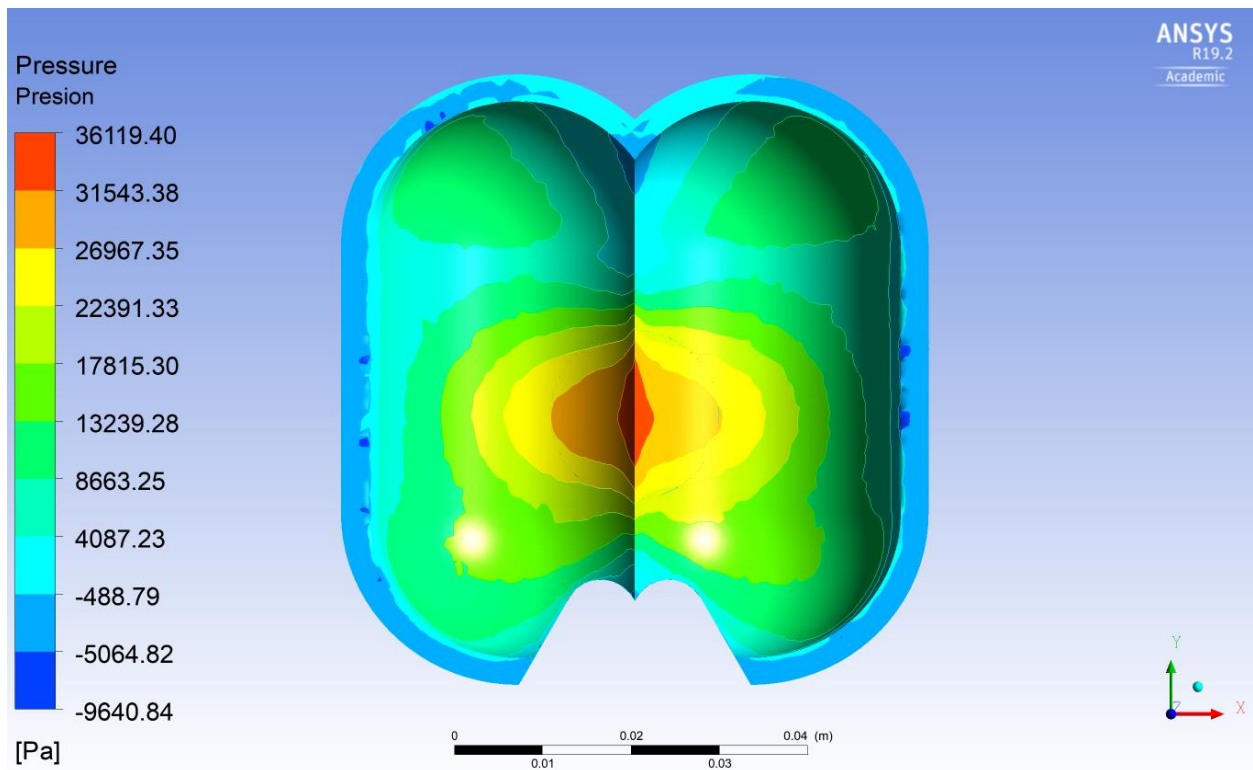
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

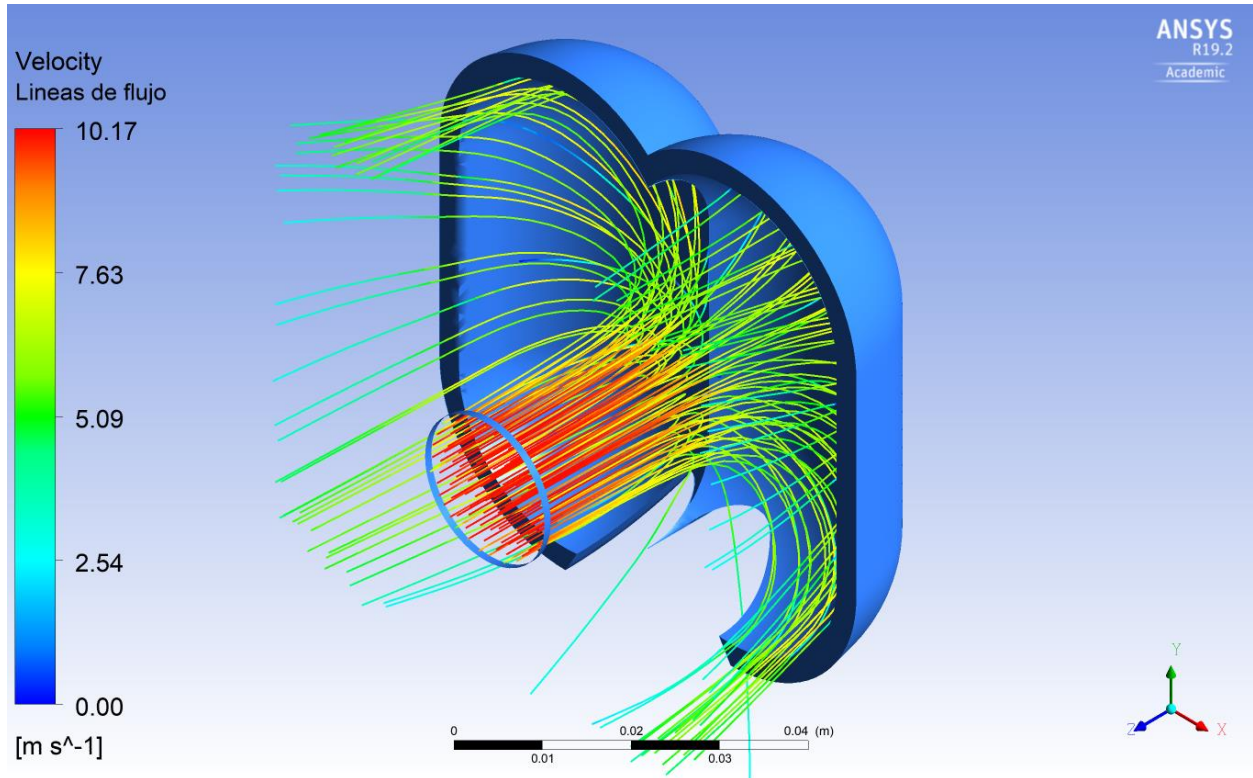


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

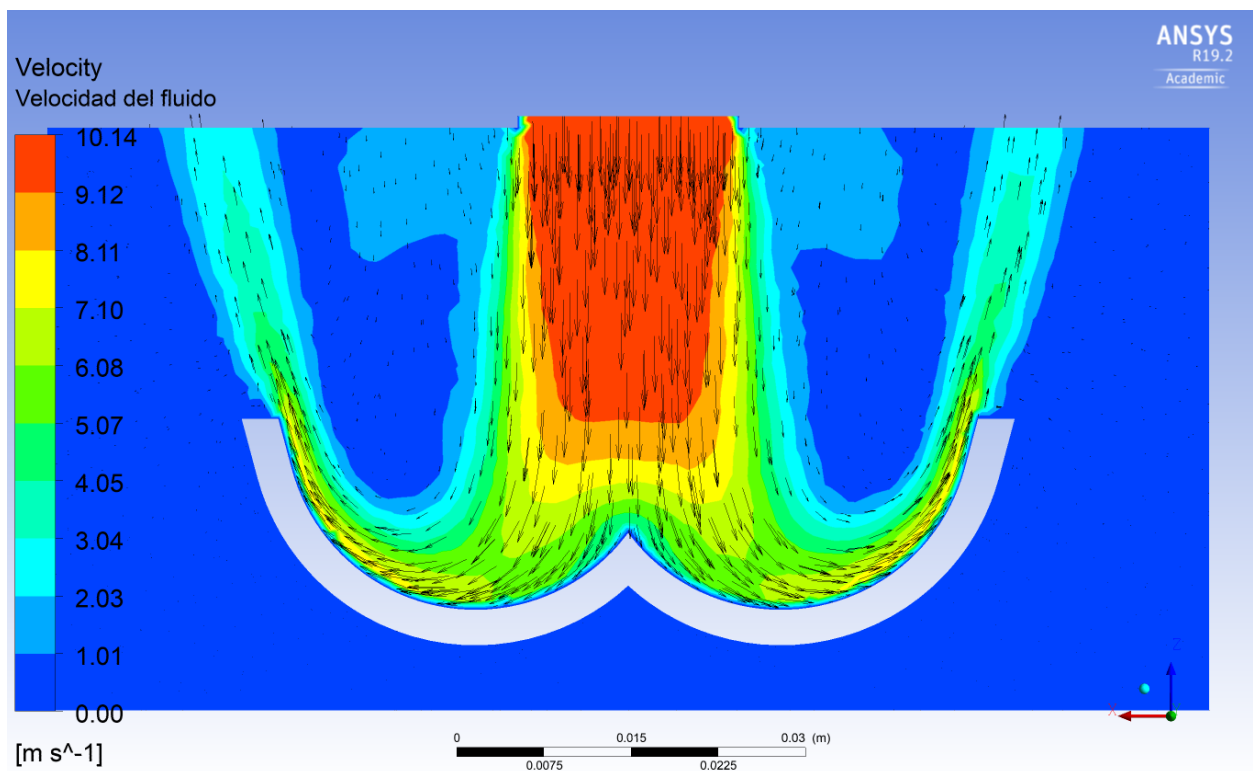


Cazoleta_1.82 d_{jet} _2.28 d_{jet} – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$)

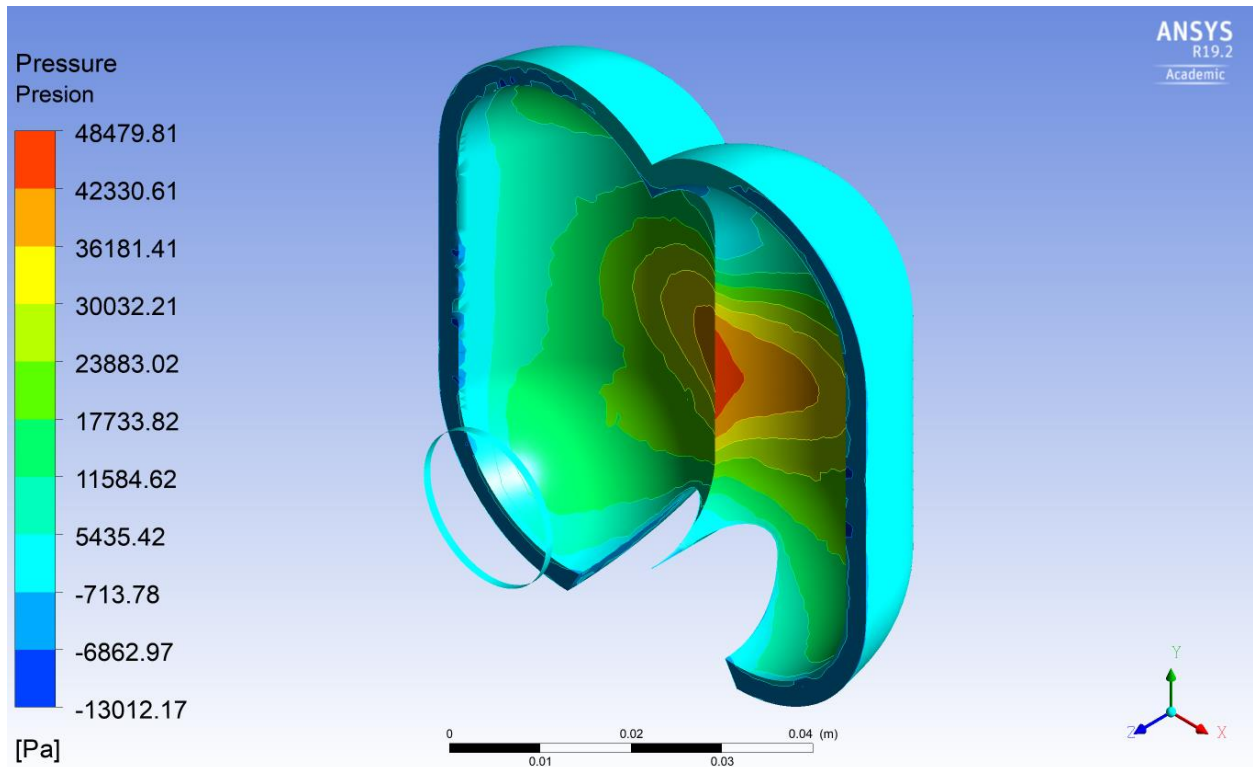
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



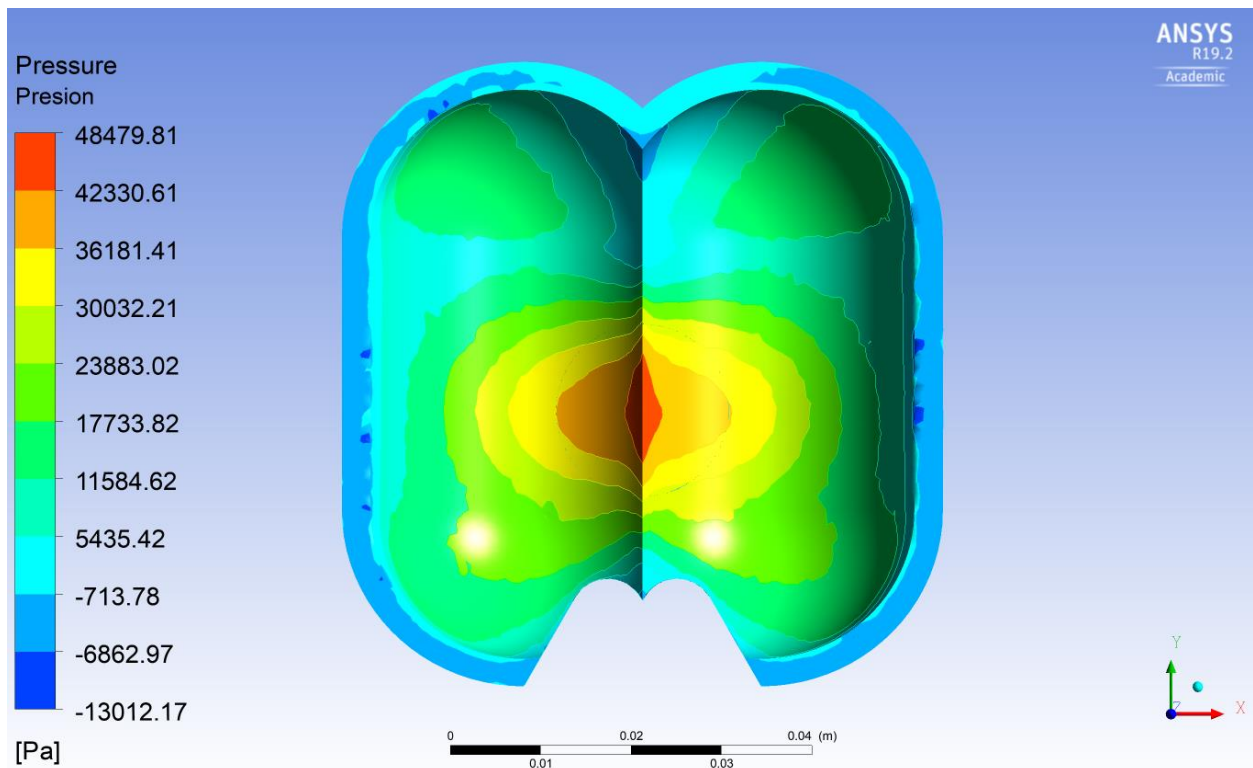
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

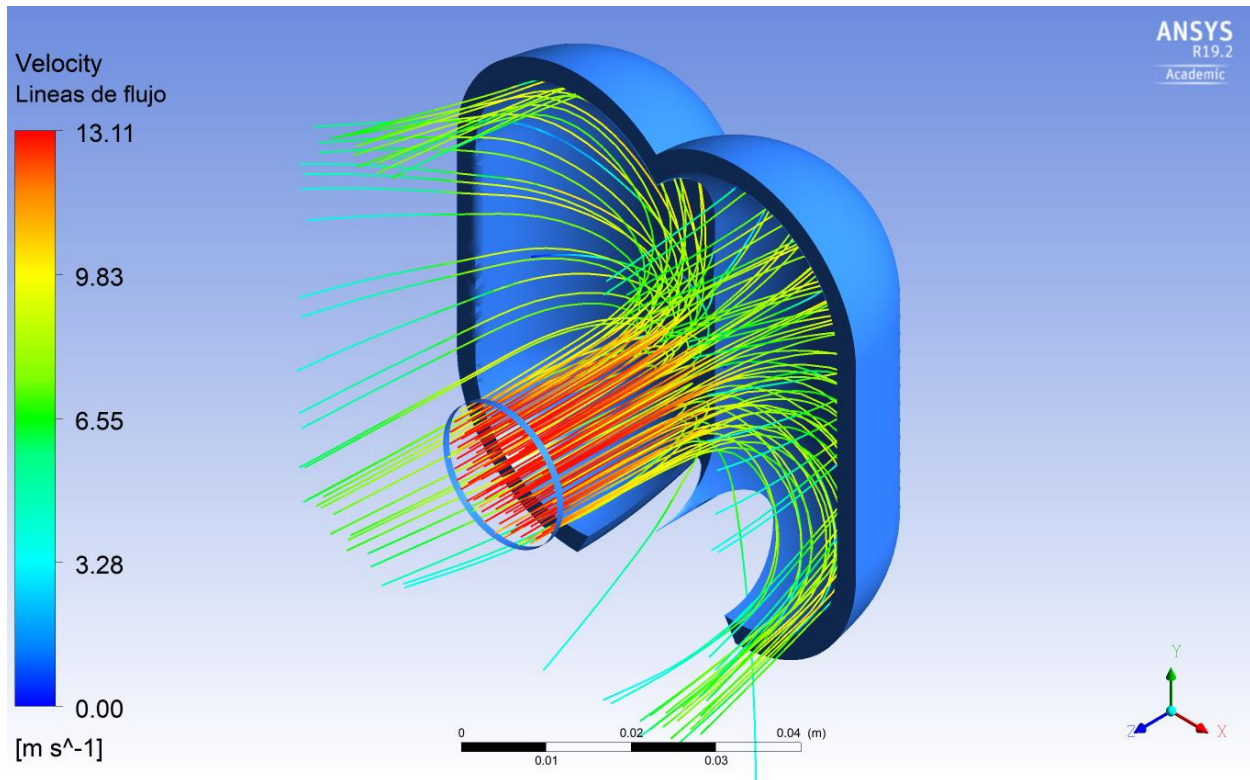


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

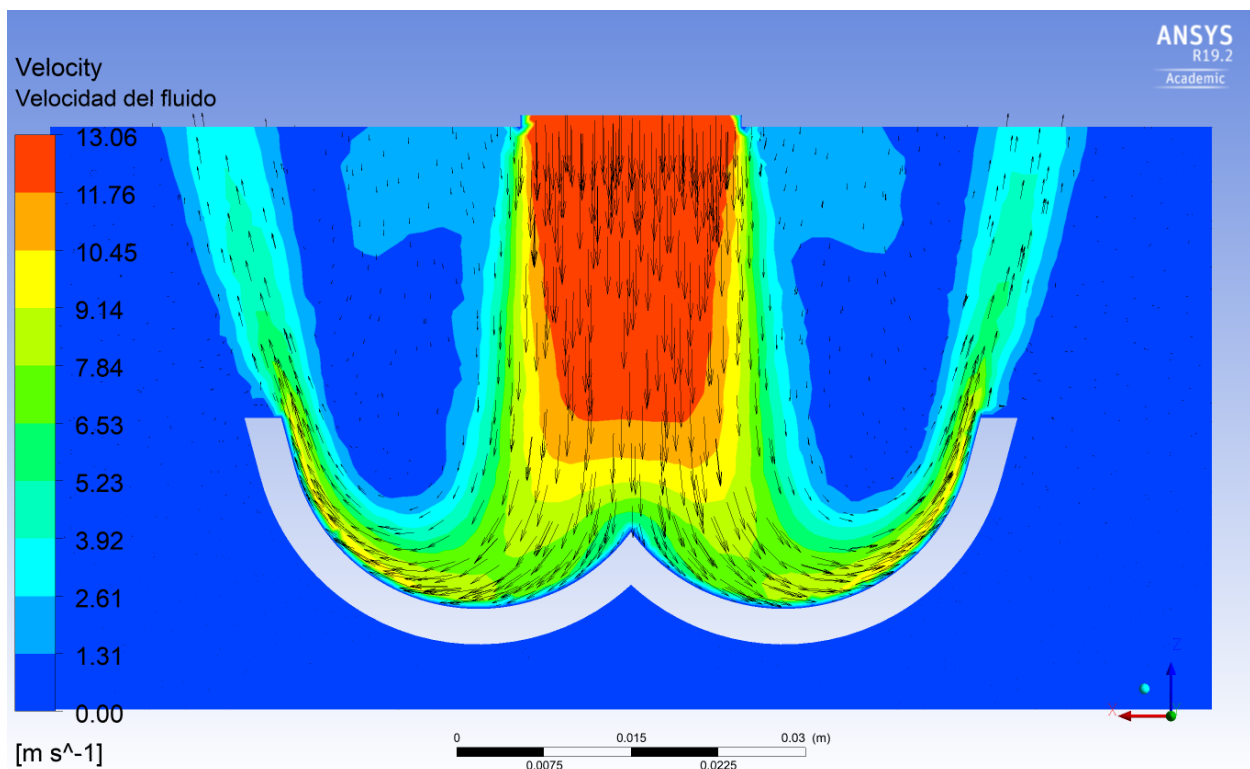


Cazoleta_1.82 $d_{jet_2.28}$ d_{jet} – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}$, $H_T = 10.0 m$)

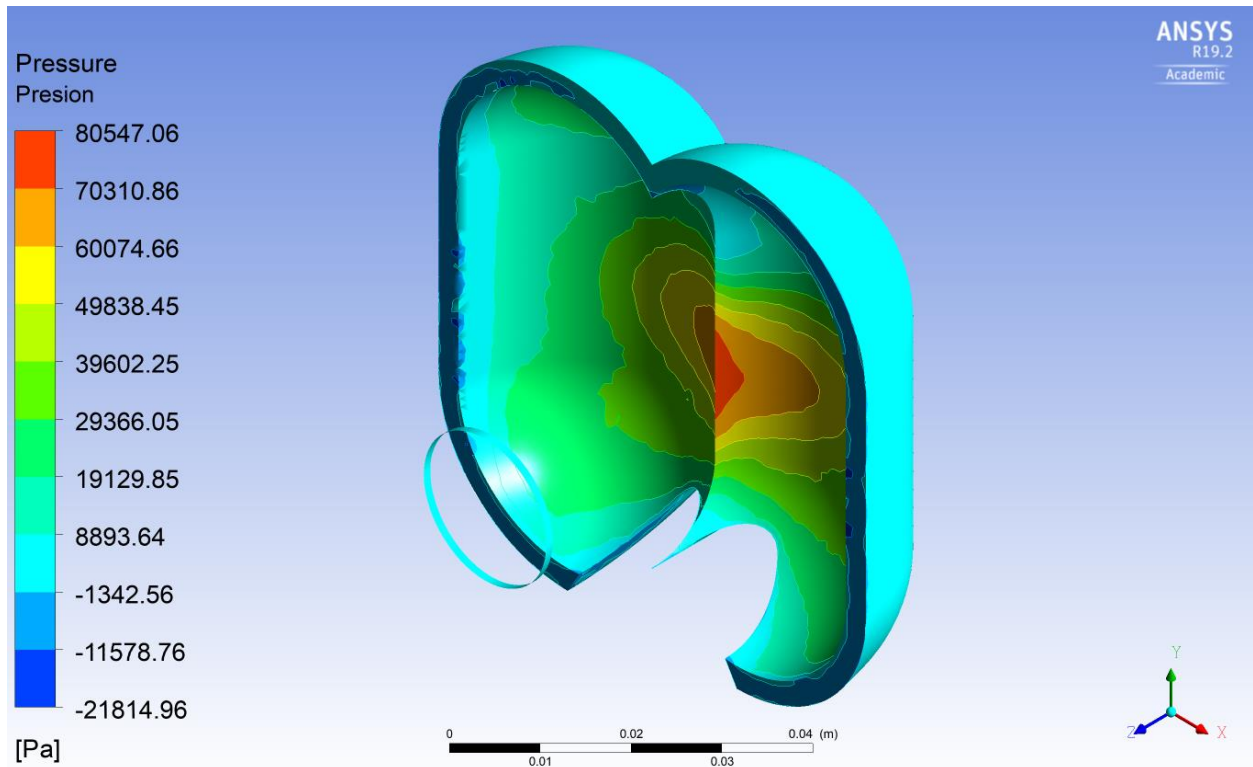
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



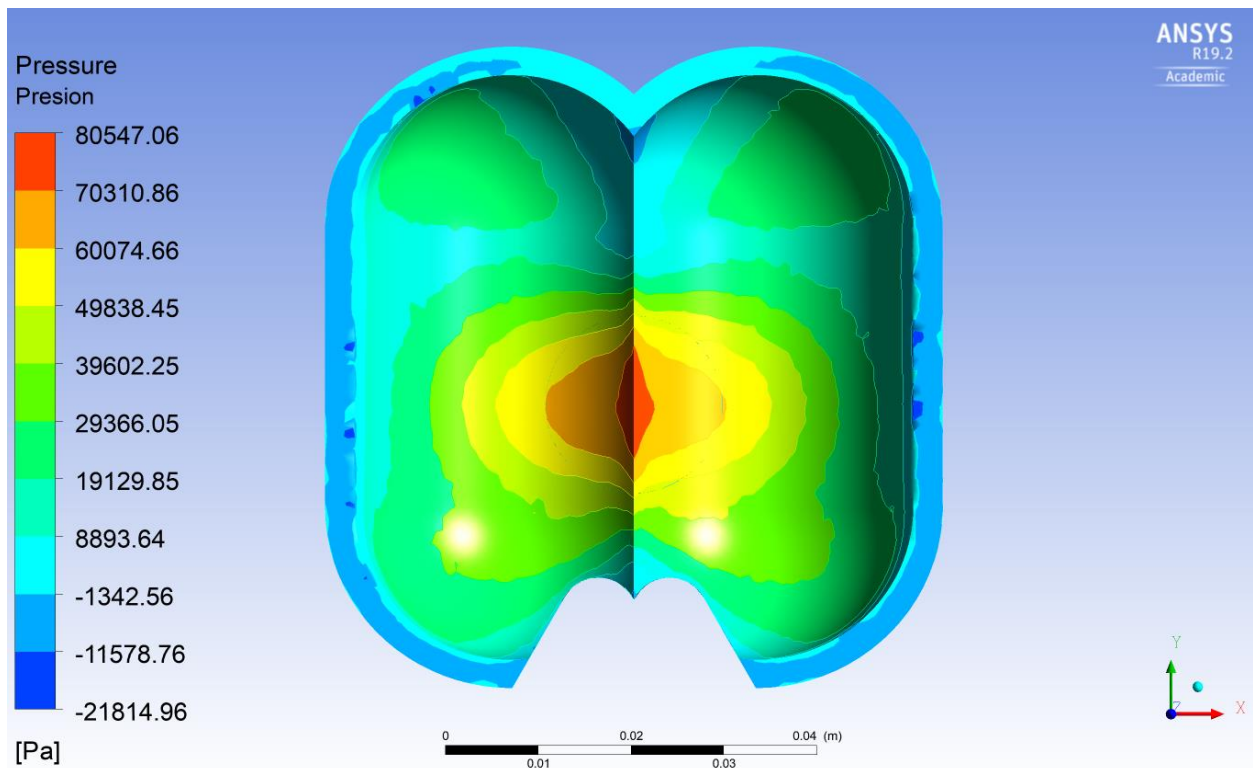
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

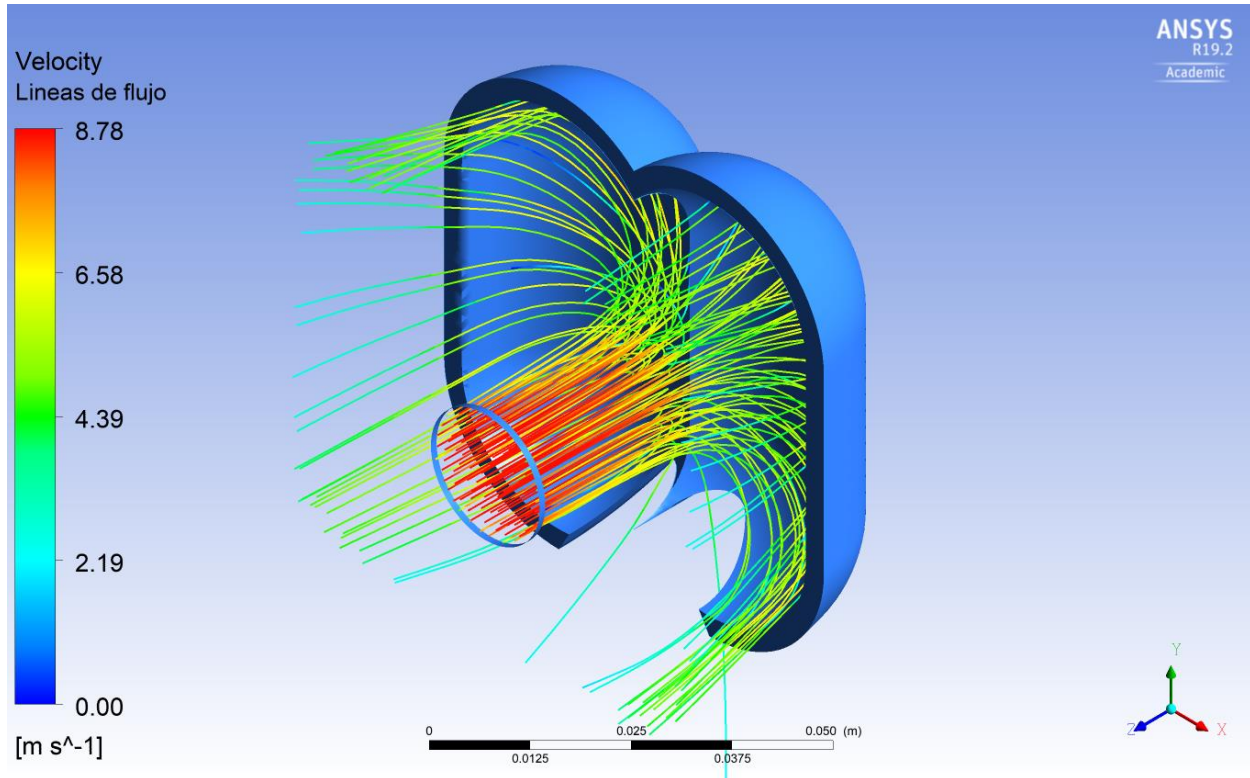


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

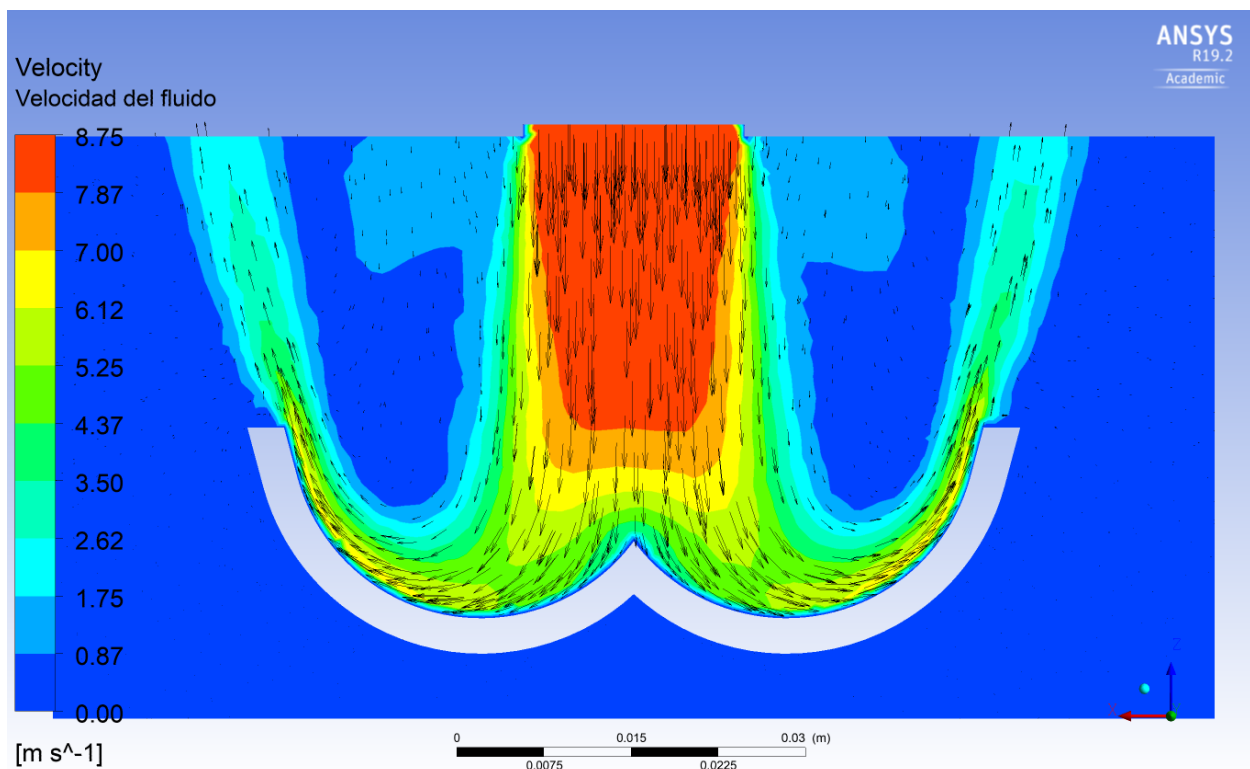


Cazoleta_1.82 d_{jet} _3.30 d_{jet} – Escenario mínimo ($\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{m}{s}$, $H_T = 4.5 m$)

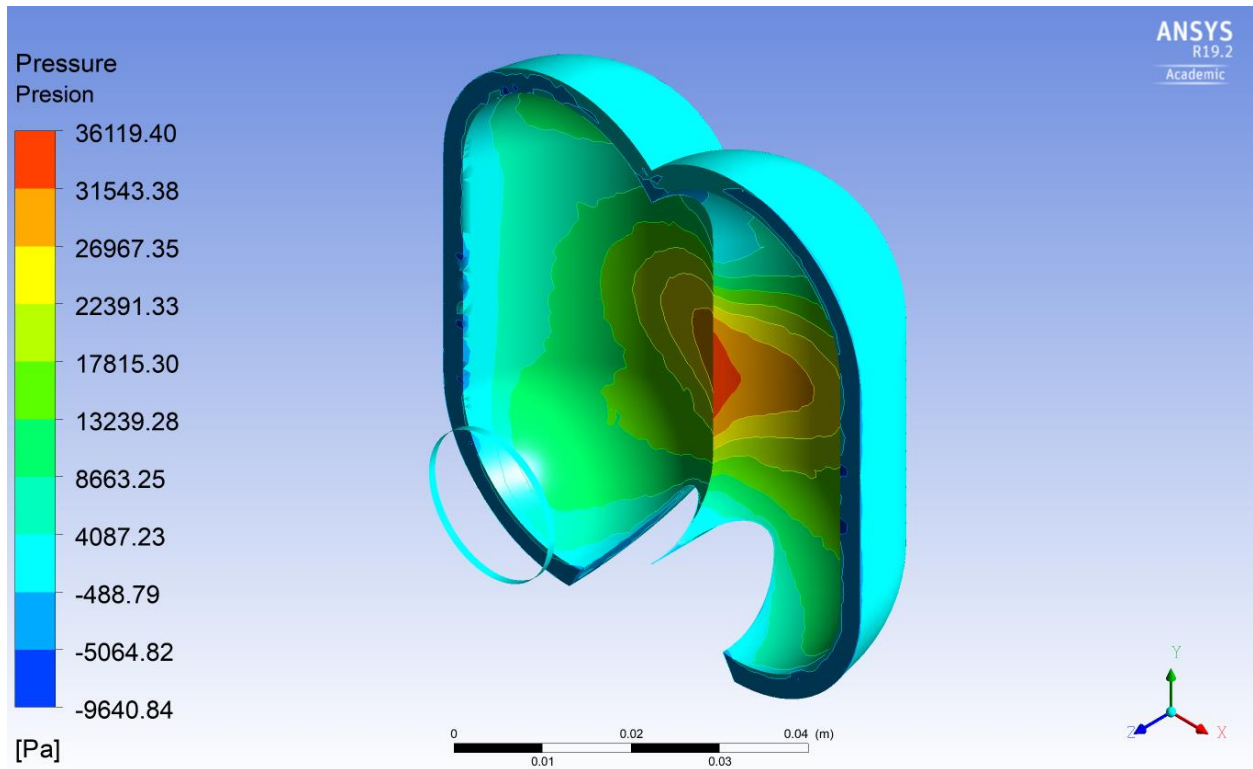
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



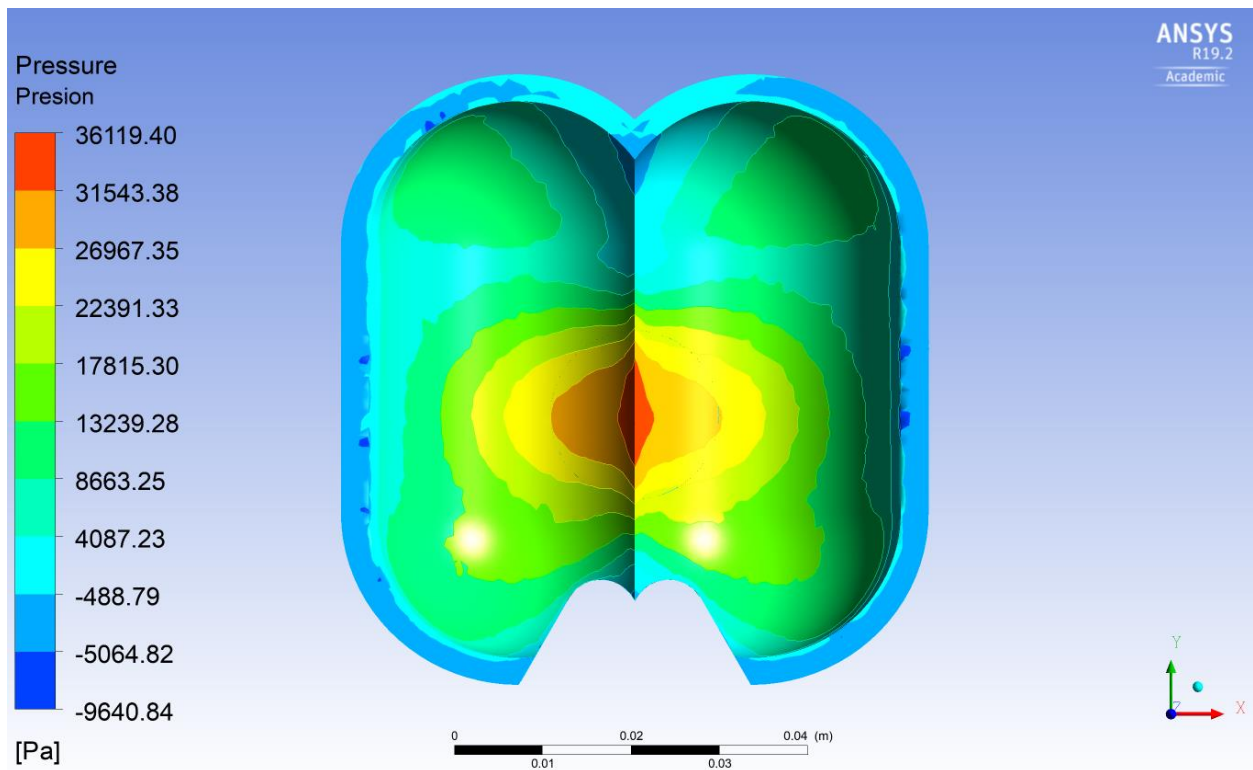
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

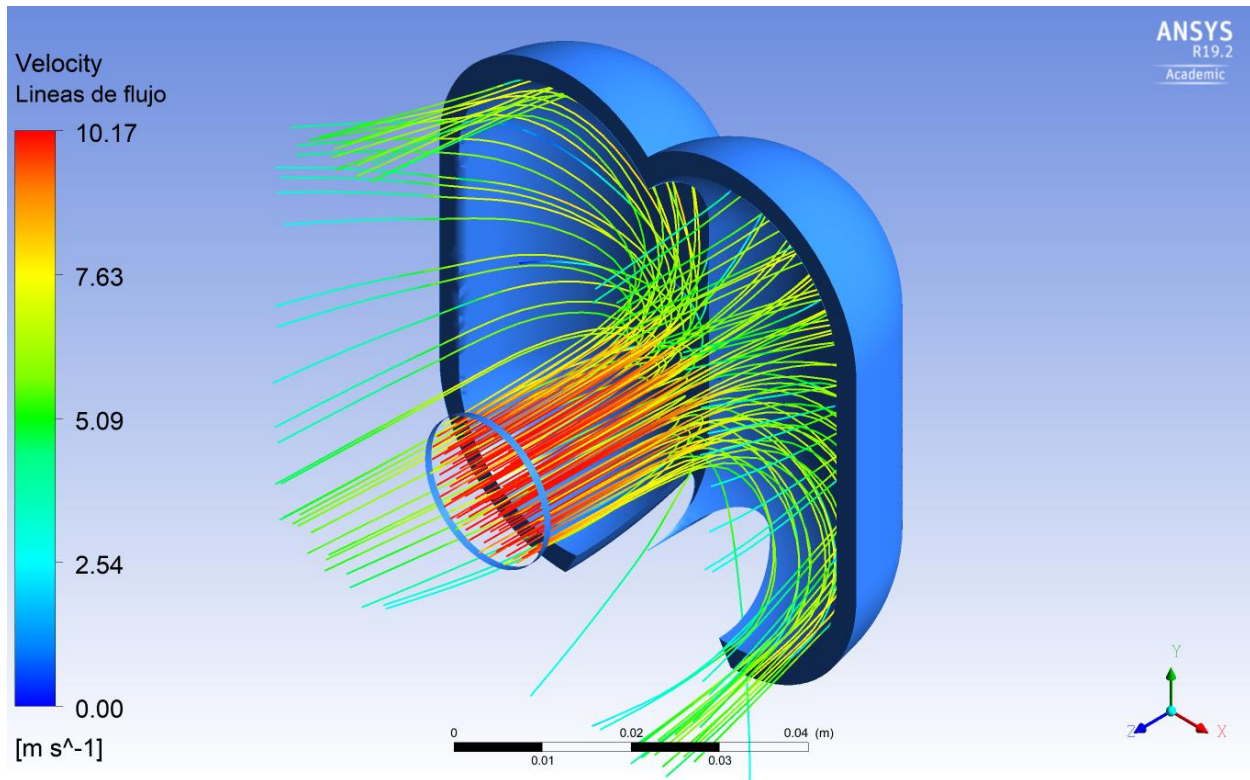


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

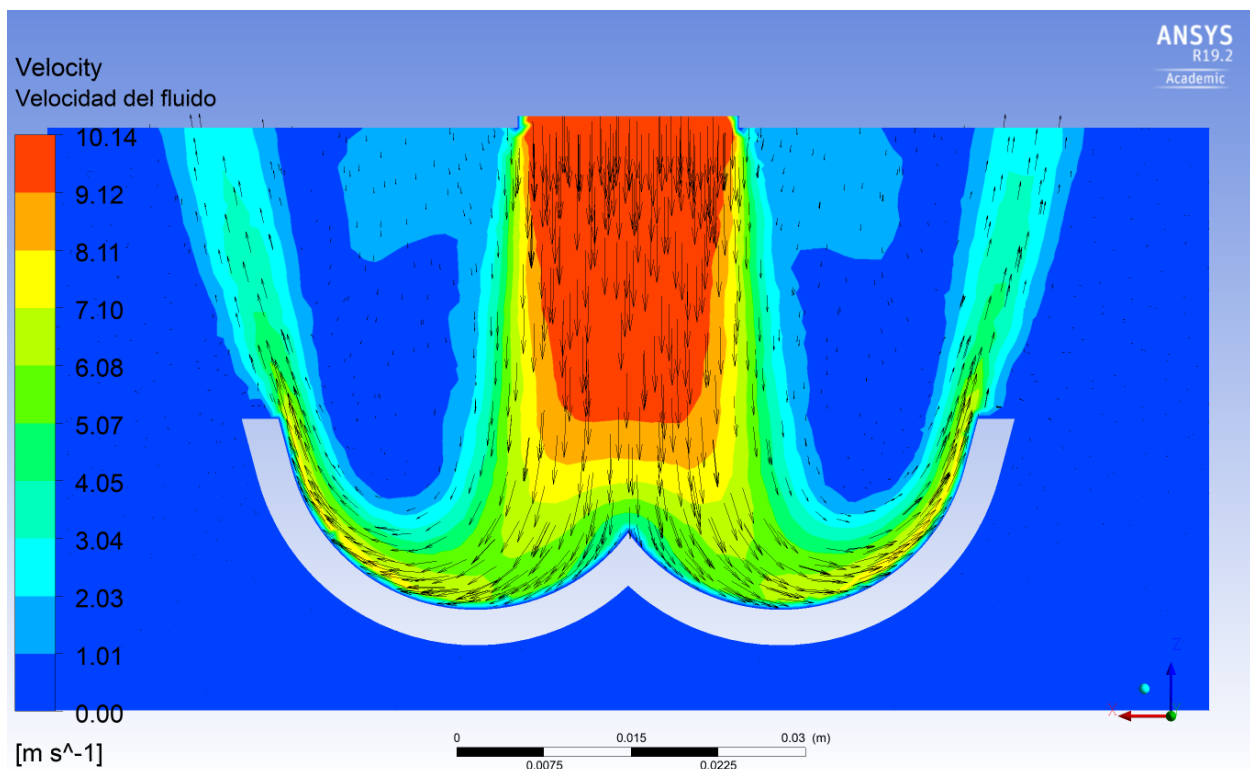


Cazoleta_1.82 d_{jet} _3.30 d_{jet} – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$)

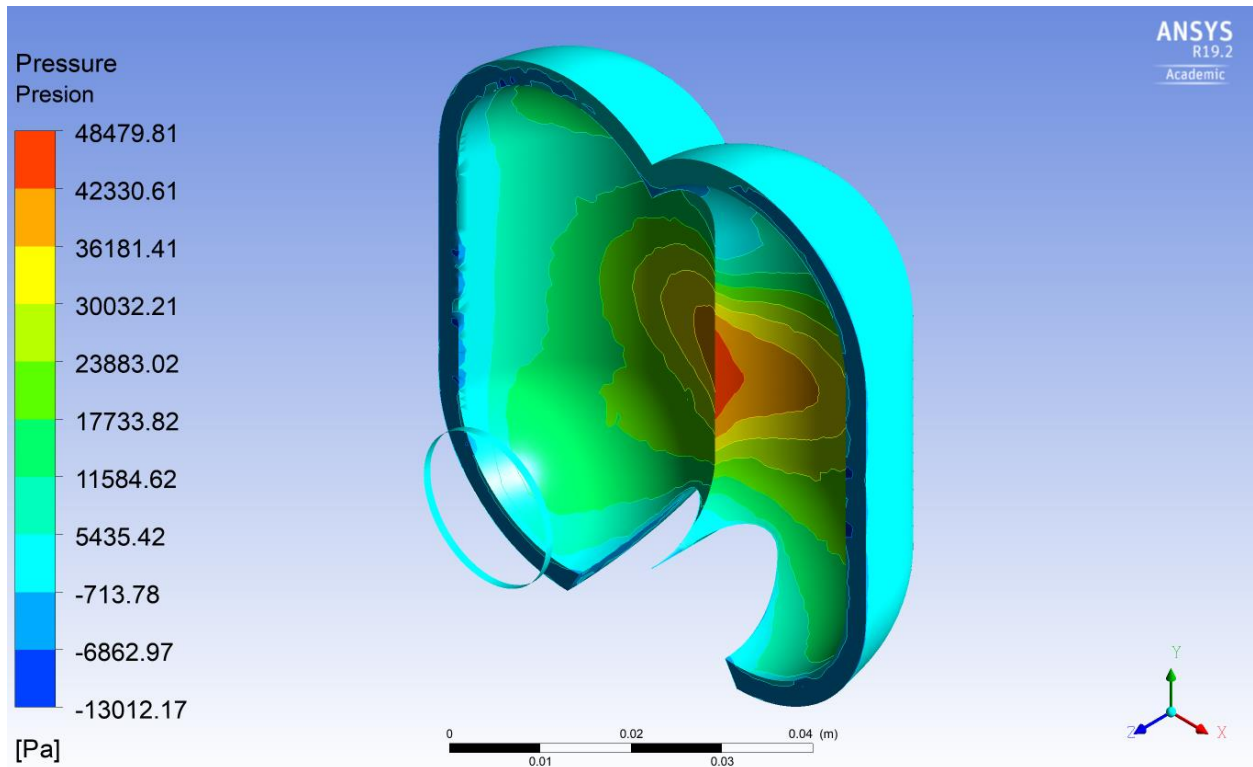
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



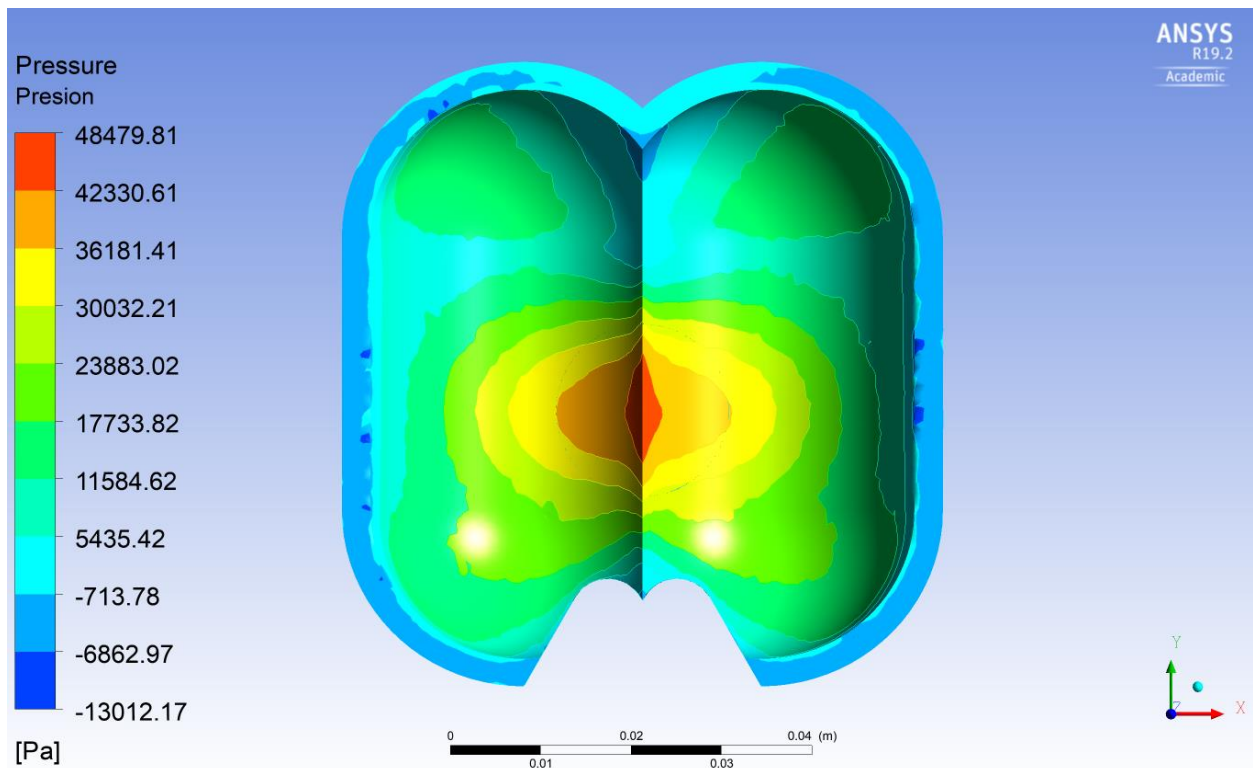
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

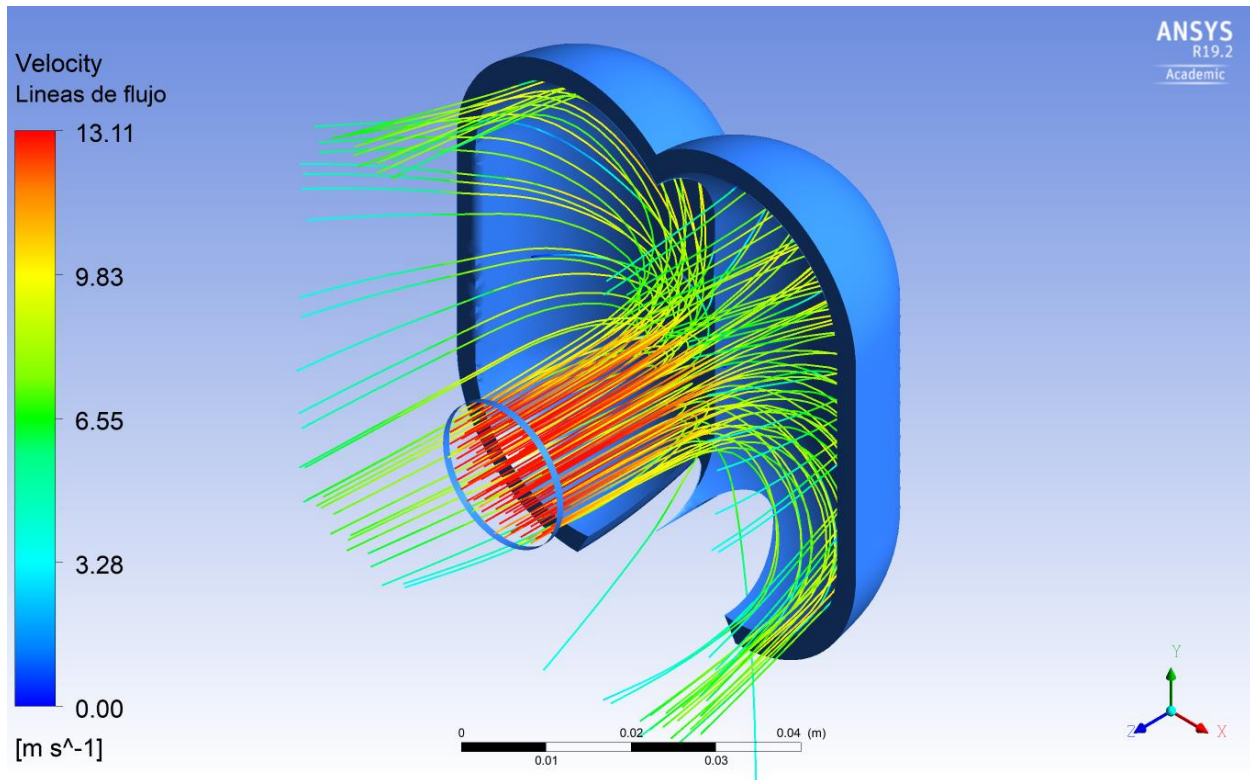


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

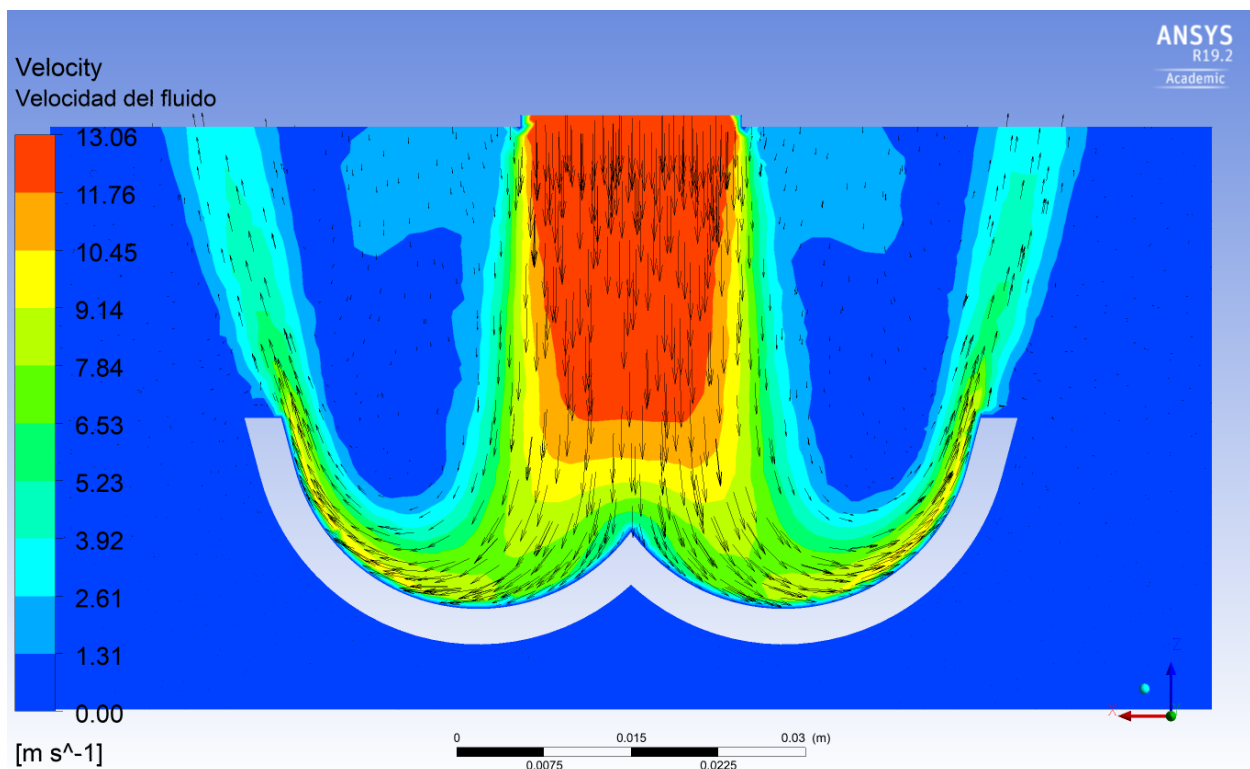


Cazoleta_1.82 d_{jet} _3.30 d_{jet} – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}$, $H_T = 10.0 m$)

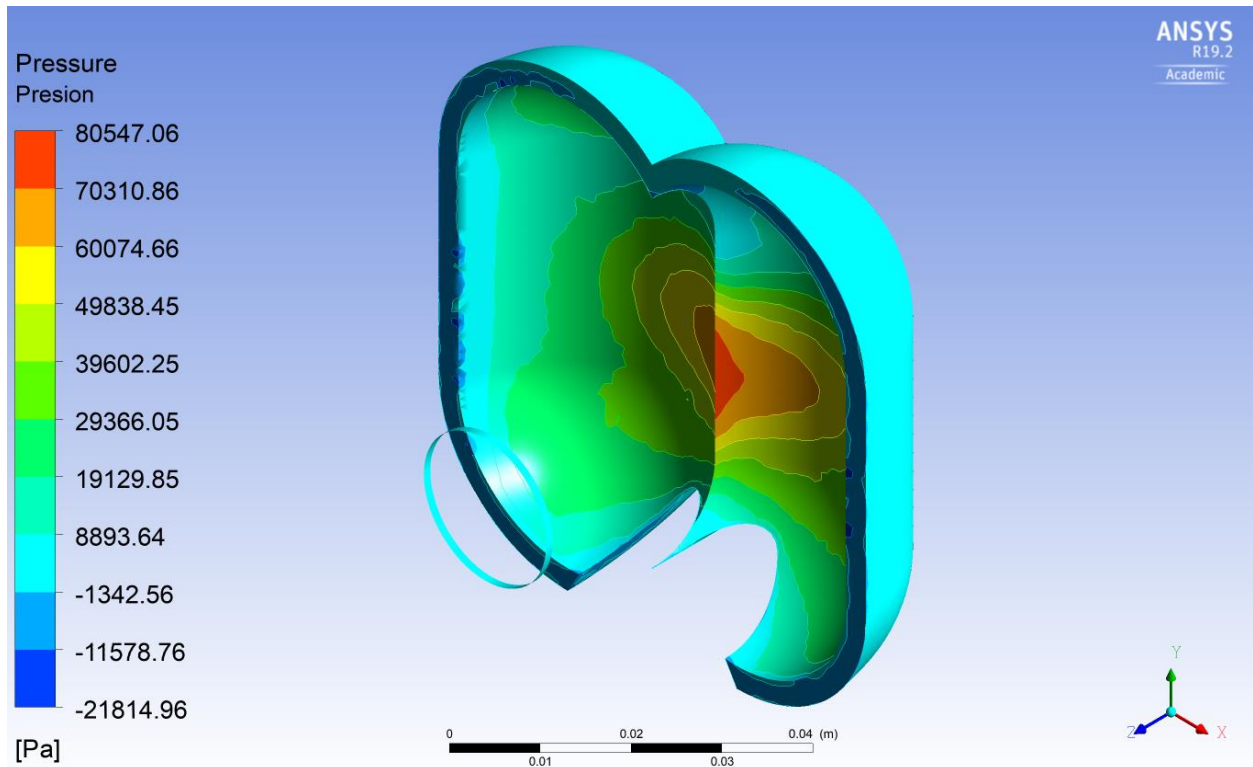
Líneas de flujo a través del dominio de la cazoleta (Velocidad)



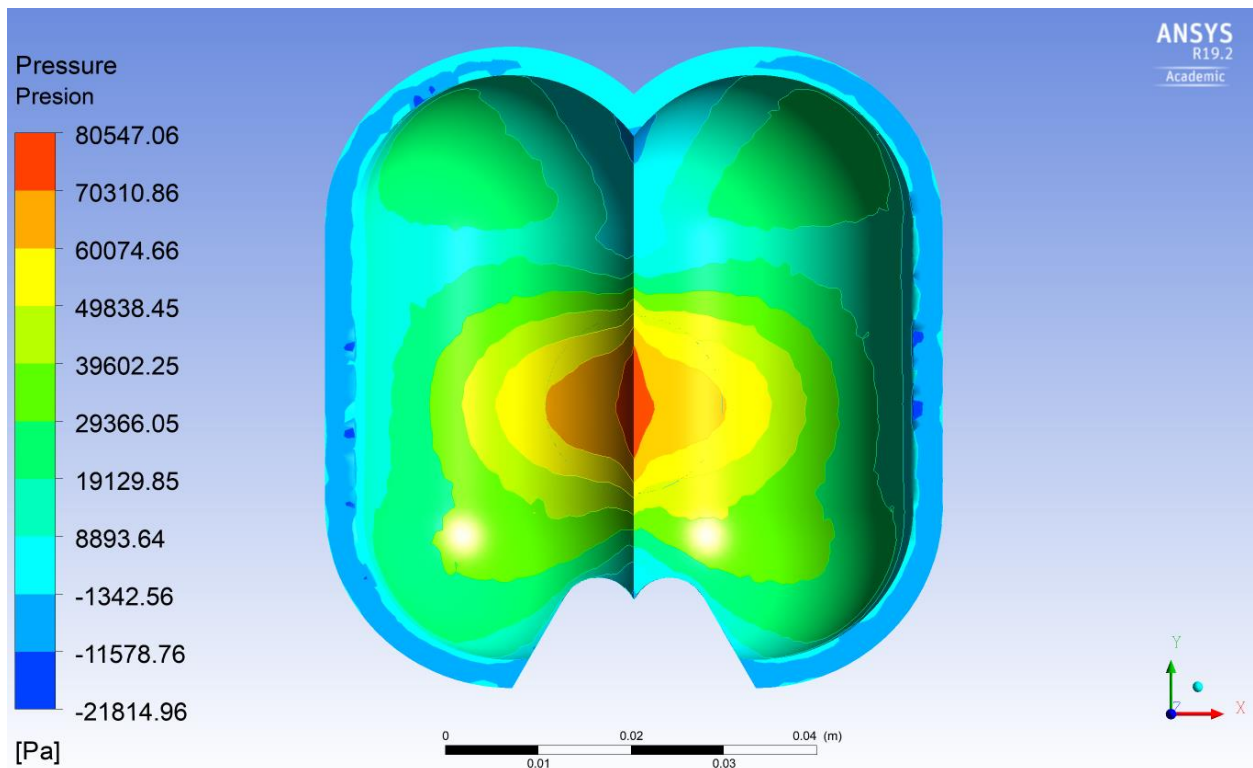
Campo de velocidad en la cazoleta



Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista isométrica

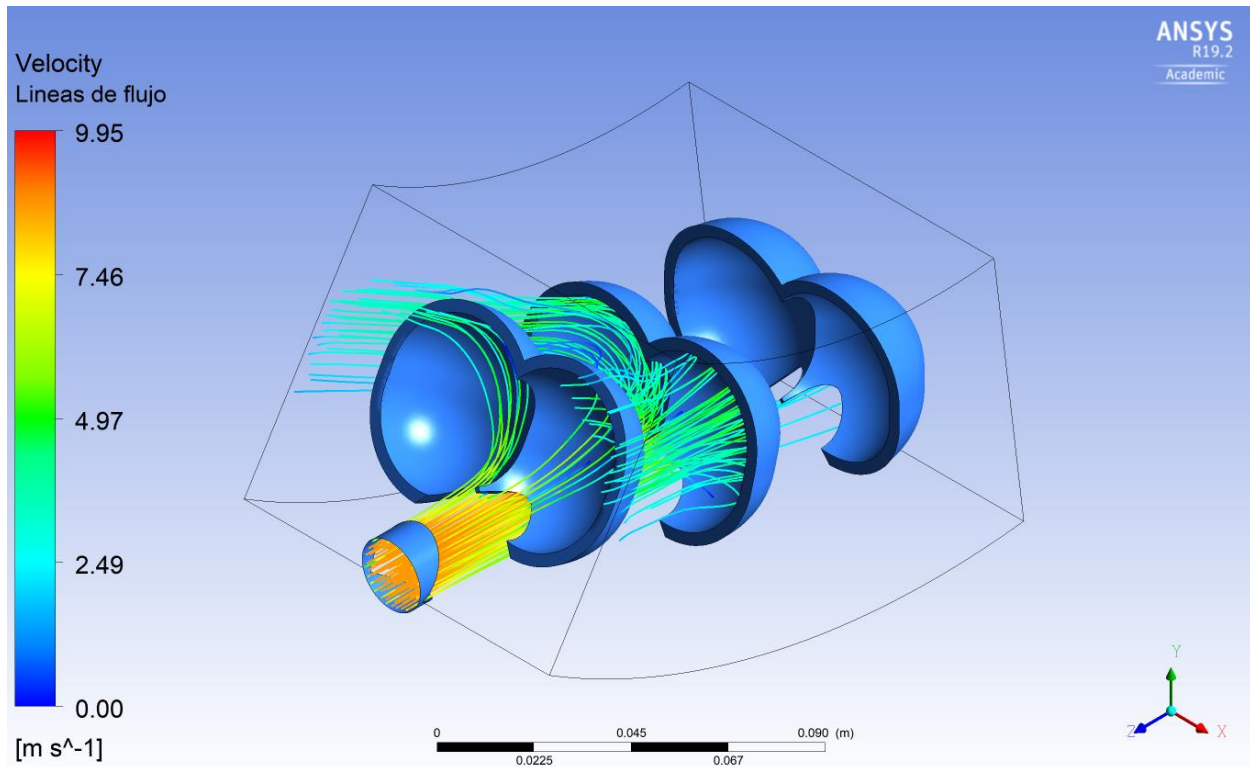


Campo de presión en la superficie de la cazoleta – Vista frontal

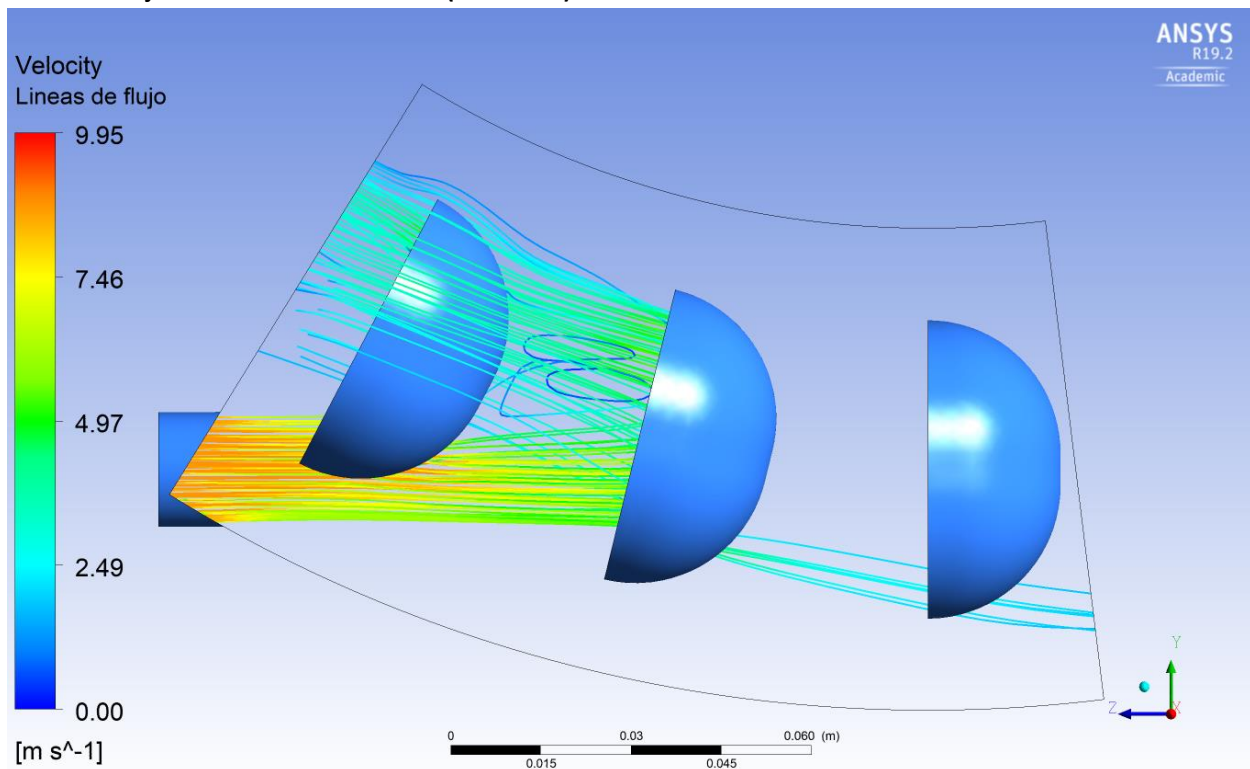


Número de cazoletas_26 *buckets_Nasir* Escenario mínimo ($\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{m}{s}, H_T = 4.5 m$)

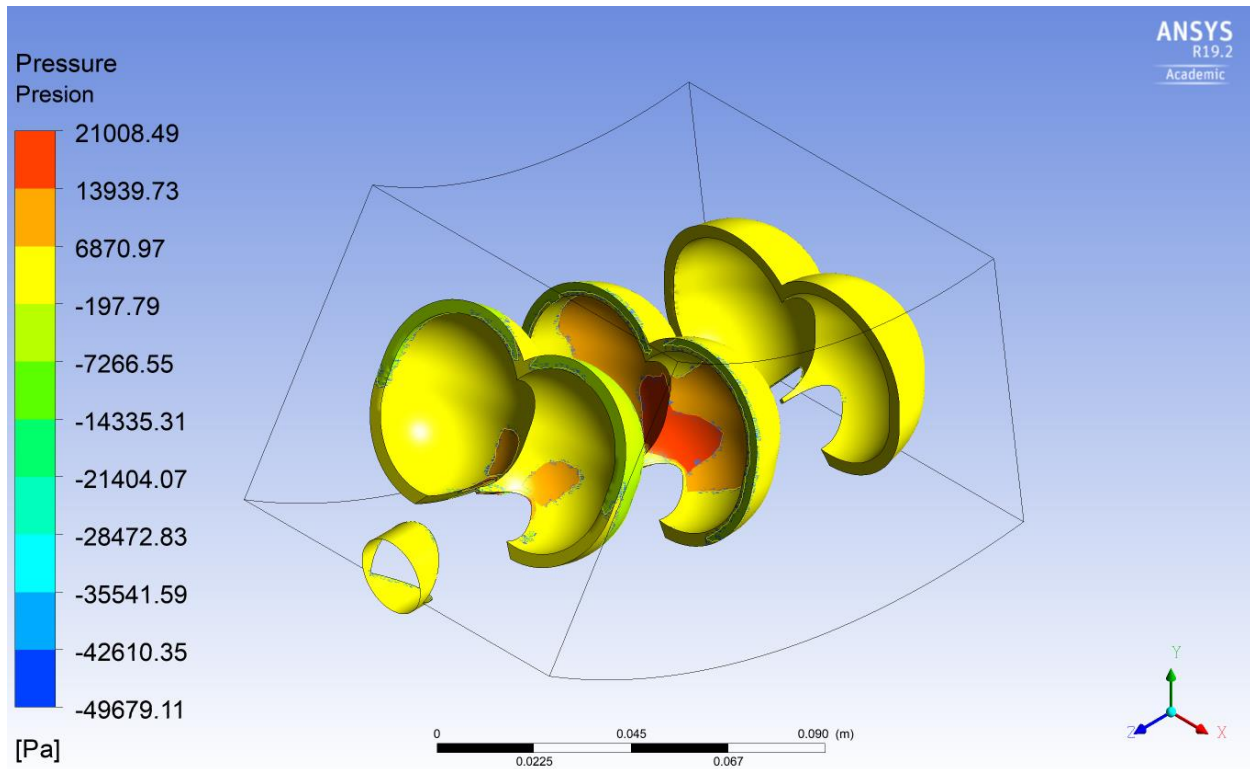
Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista isométrica



Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista lateral

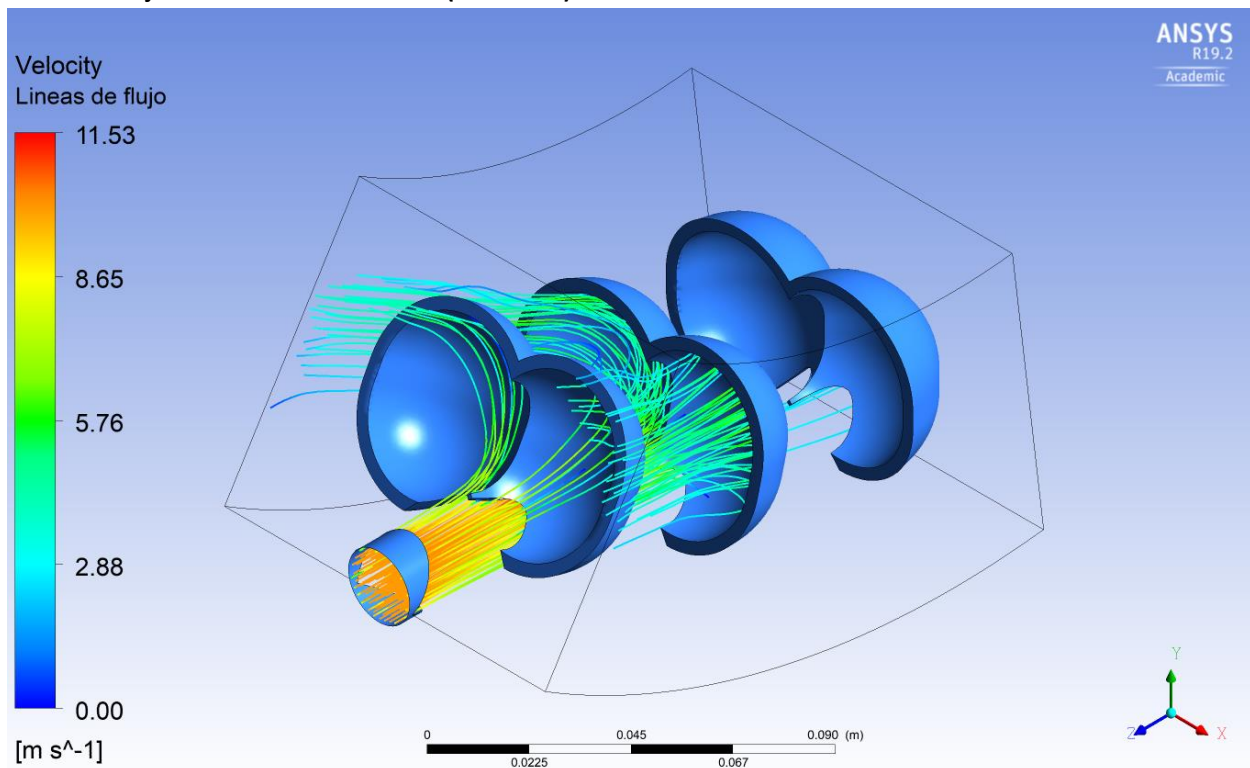


Campo de presión en la superficie de las cazoletas

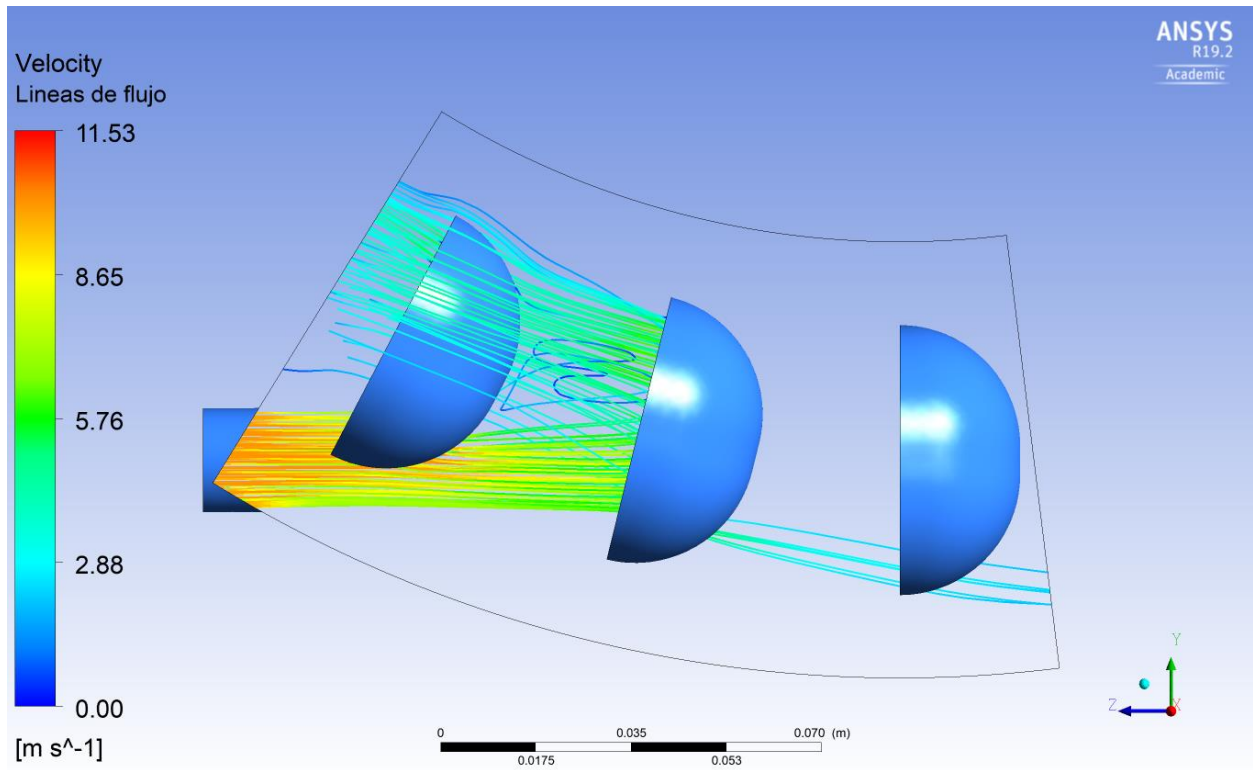


Número de cazoletas_26 *buckets_Nasir* Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$)

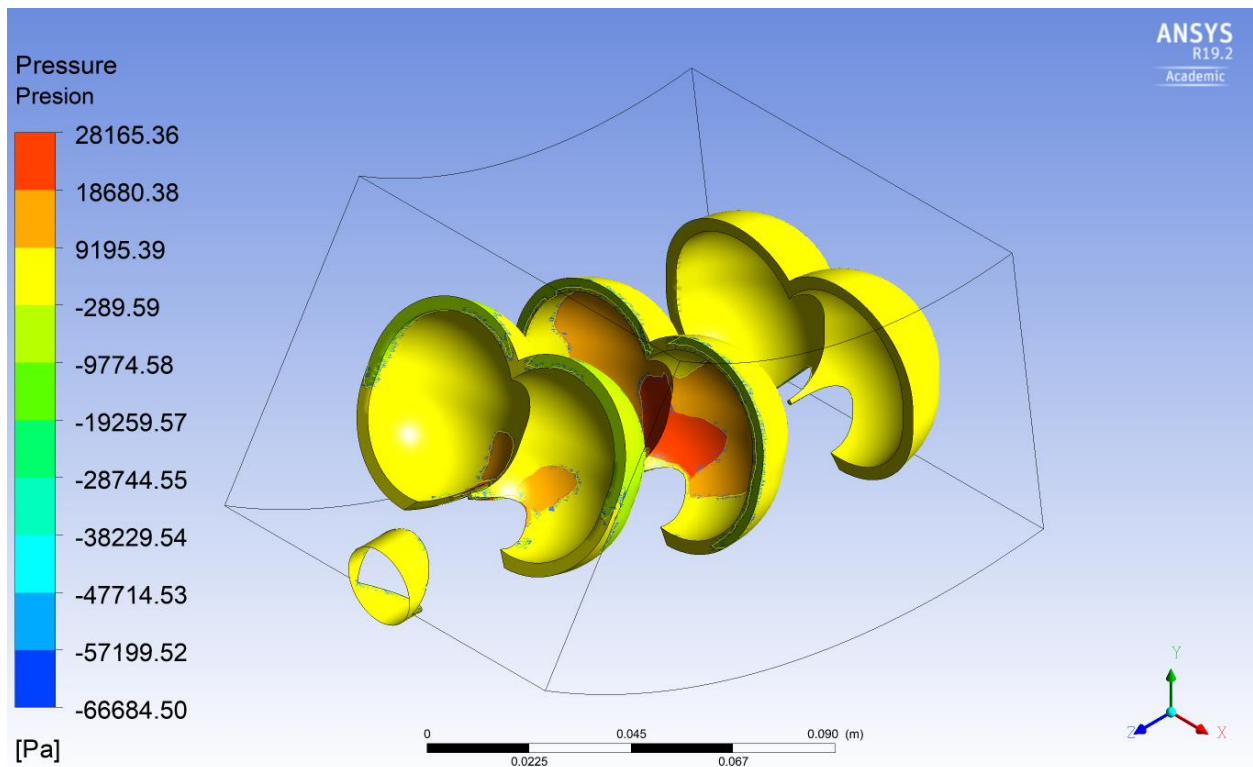
Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista isométrica



Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista lateral

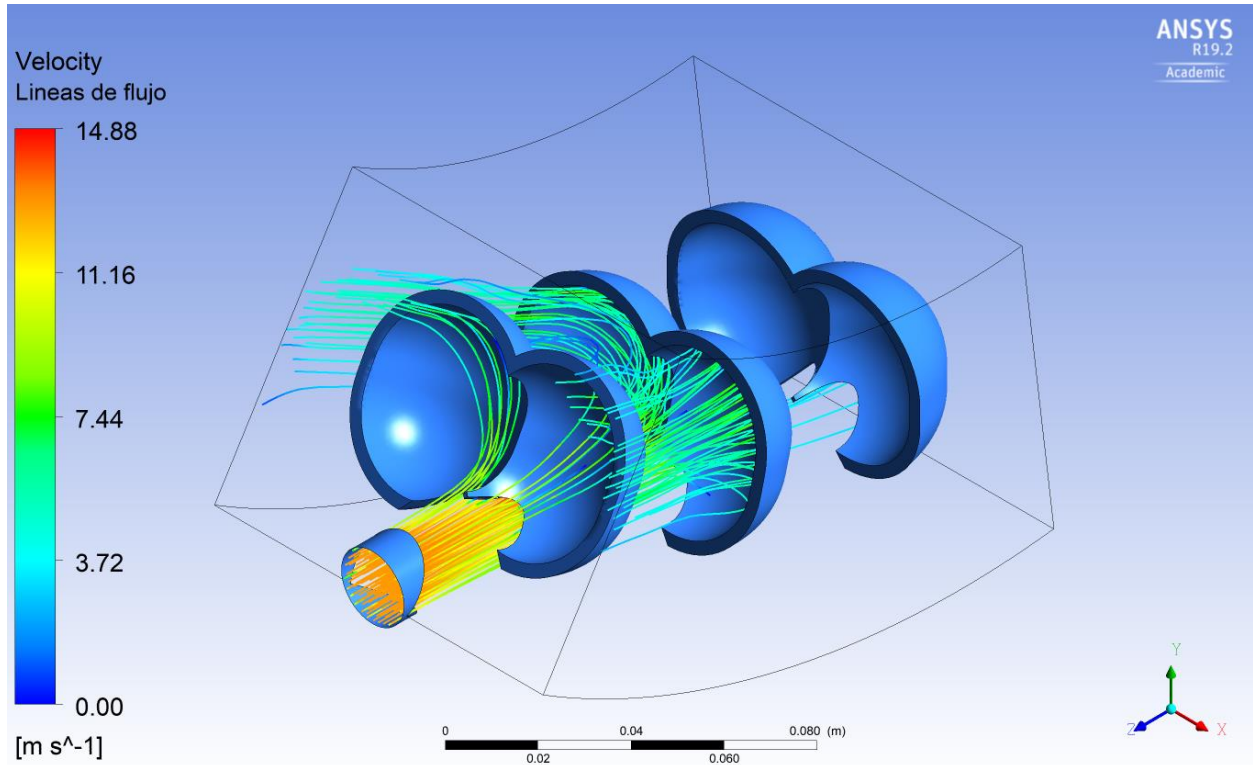


Campo de presión en la superficie de las cazoletas

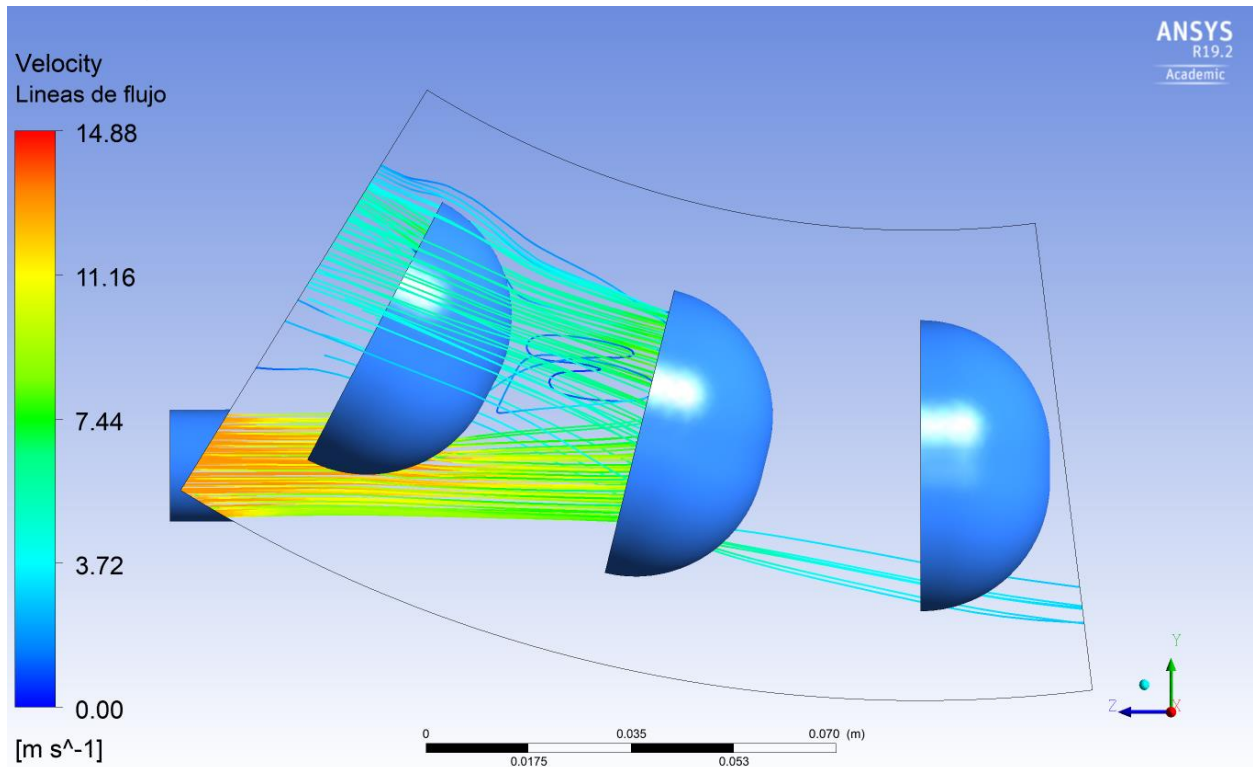


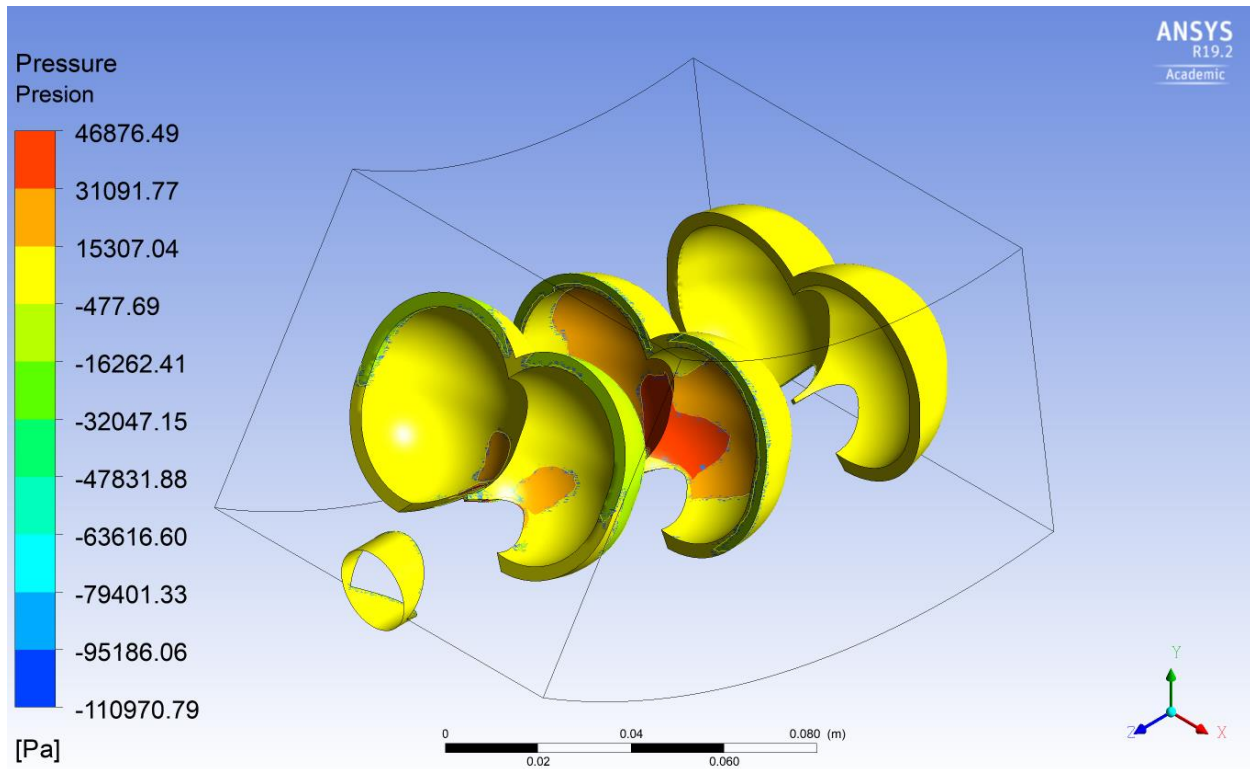
Número de cazoletas_26 buckets_Nasir Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}, H_T = 10.0 m$)

Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista isométrica



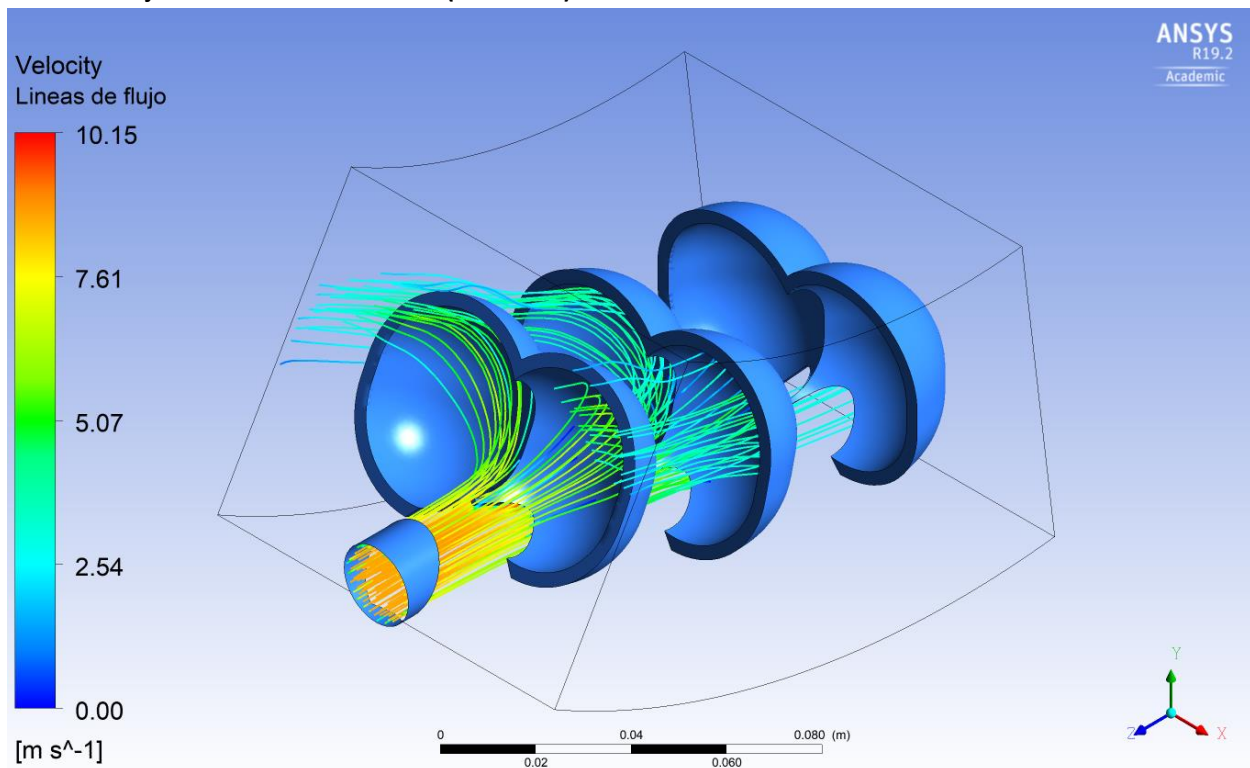
Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista lateral



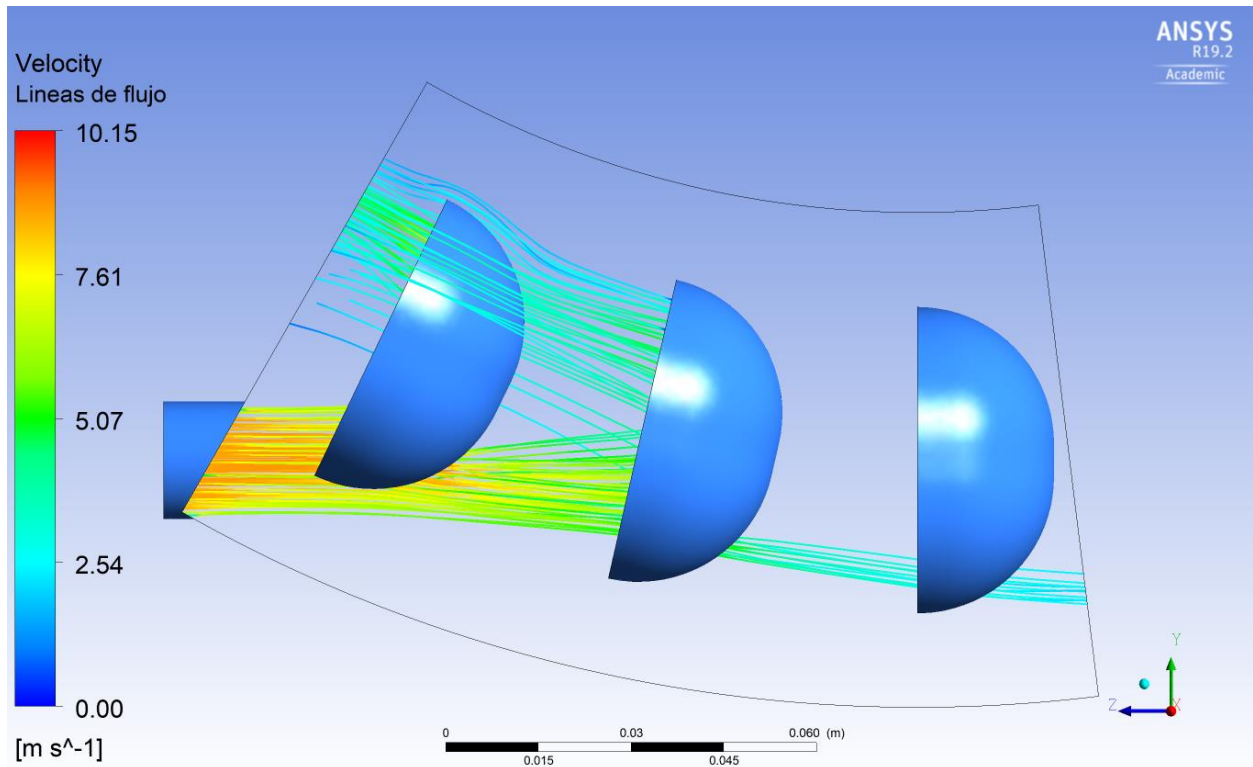
Campo de presión en la superficie de las cazoletas


Número de cazoletas_28 *buckets_Nechleba* Escenario mínimo ($\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{m}{s}$, $H_T = 4.5 m$)

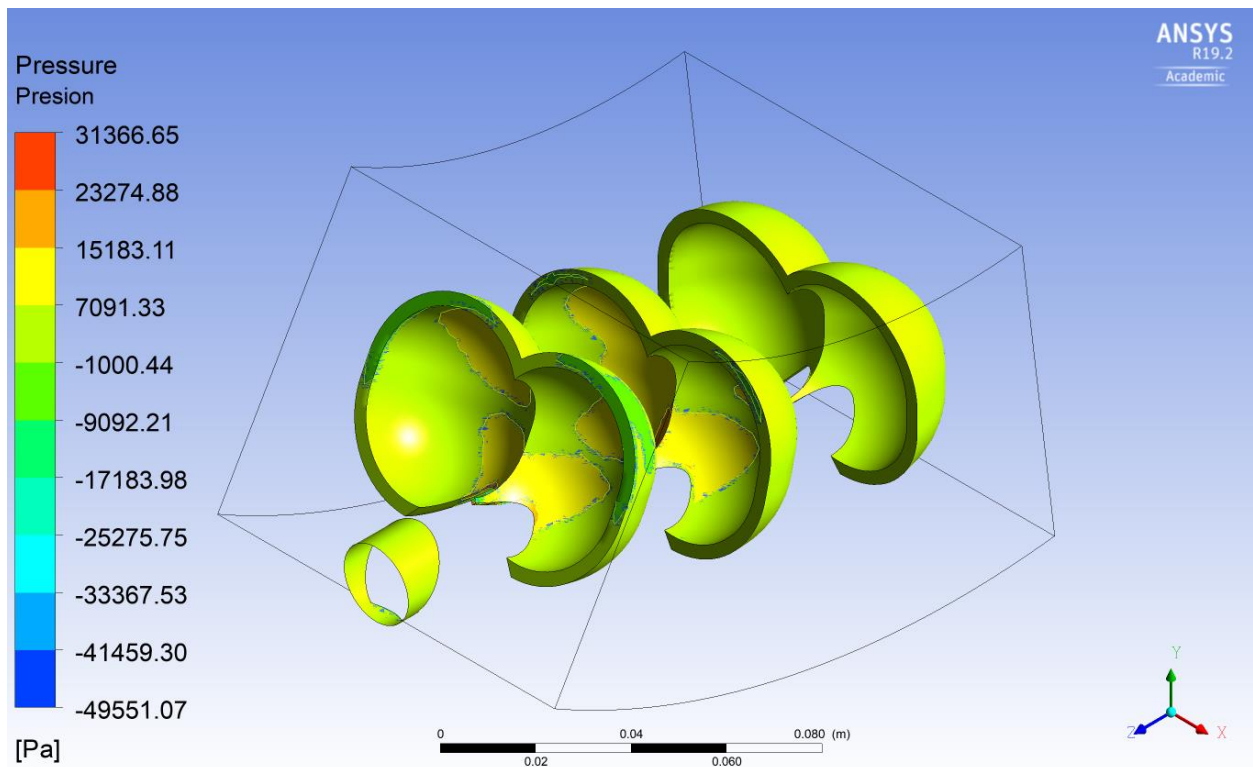
Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista isométrica



Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista lateral

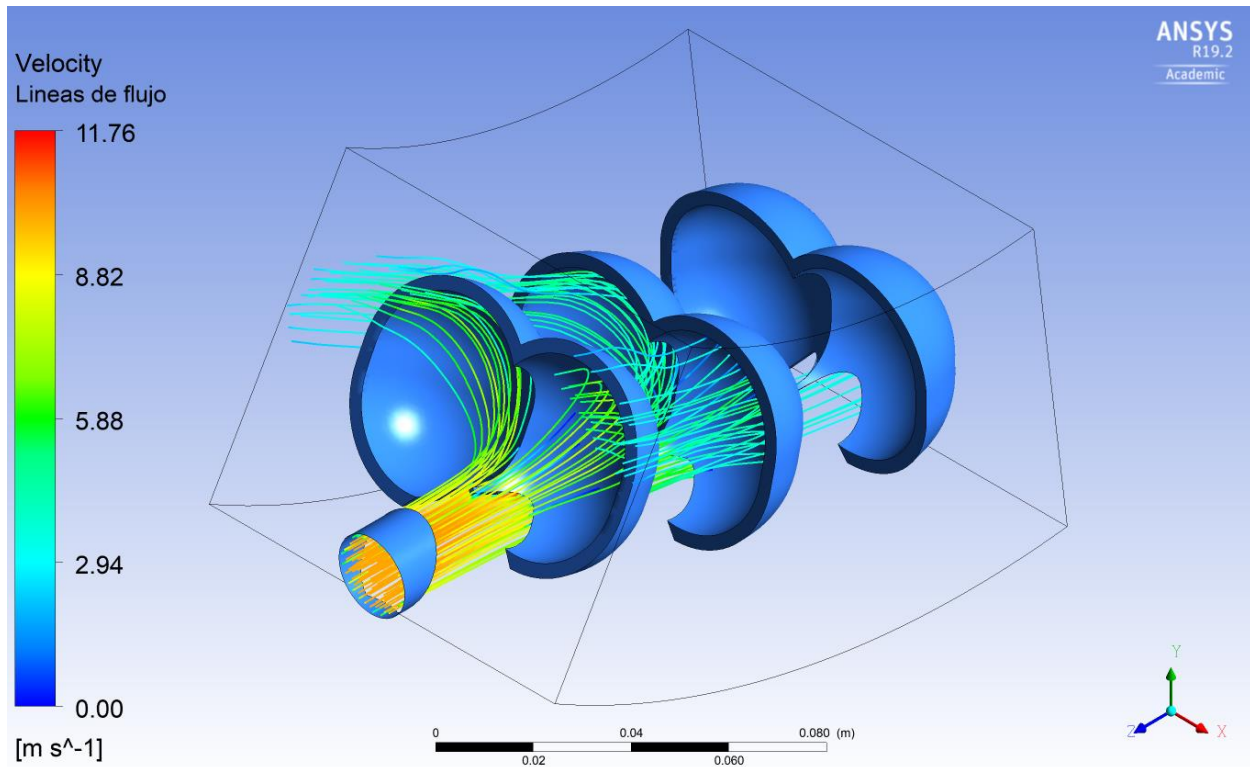


Campo de presión en la superficie de las cazoletas

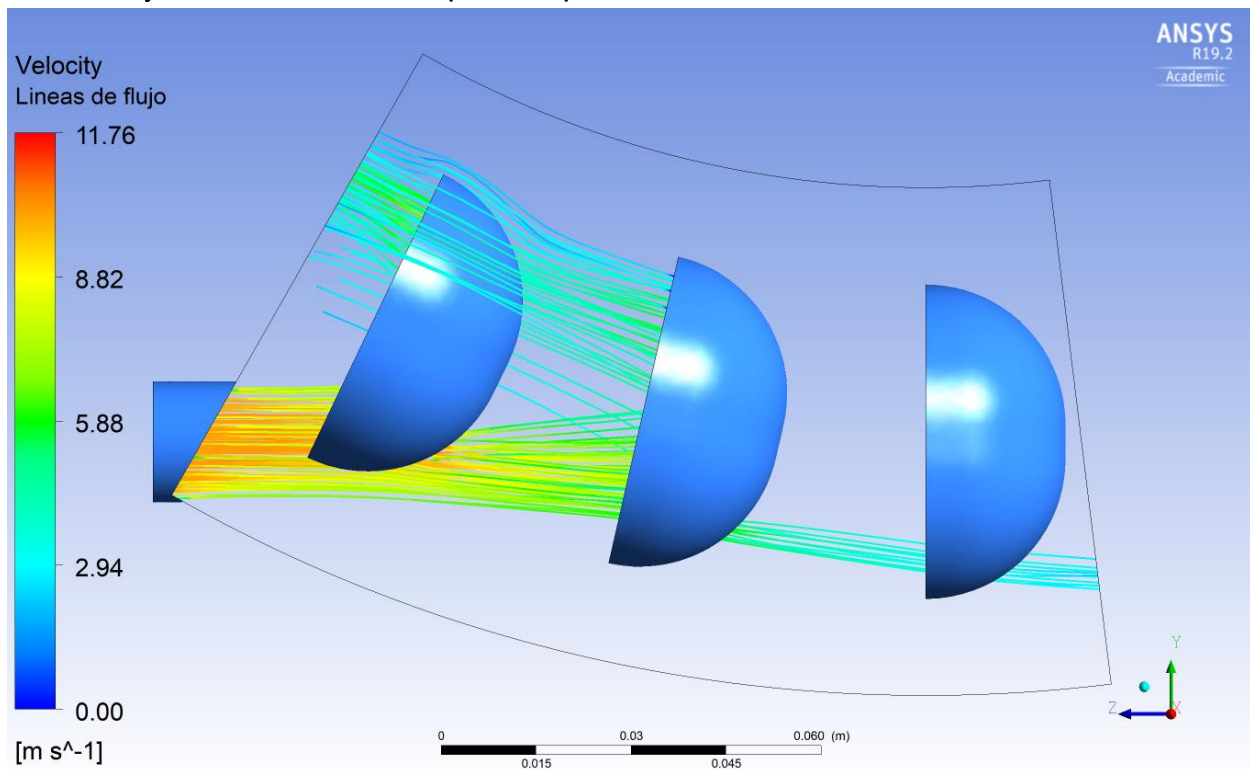


Número de cazoletas_28 buckets_Nechleba Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}, H_T = 6.0 m$)

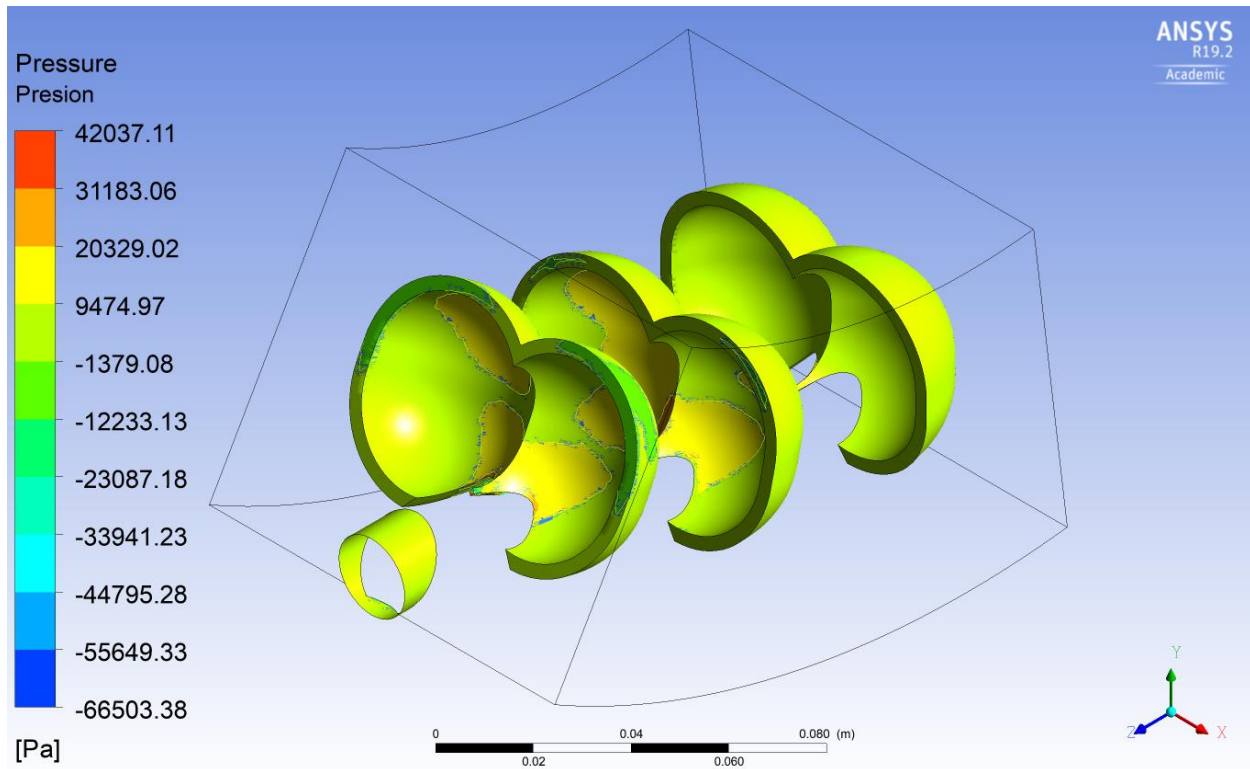
Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista isométrica



Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista lateral

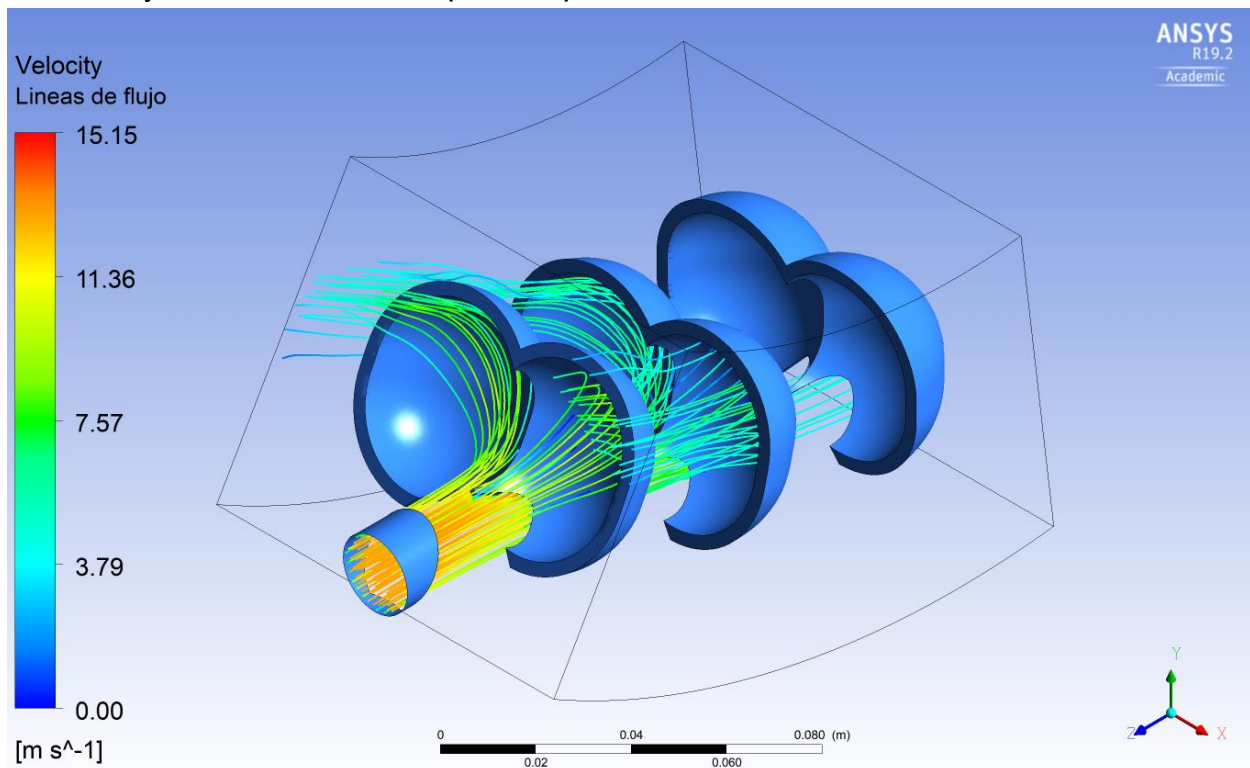


Campo de presión en la superficie de las cazoletas

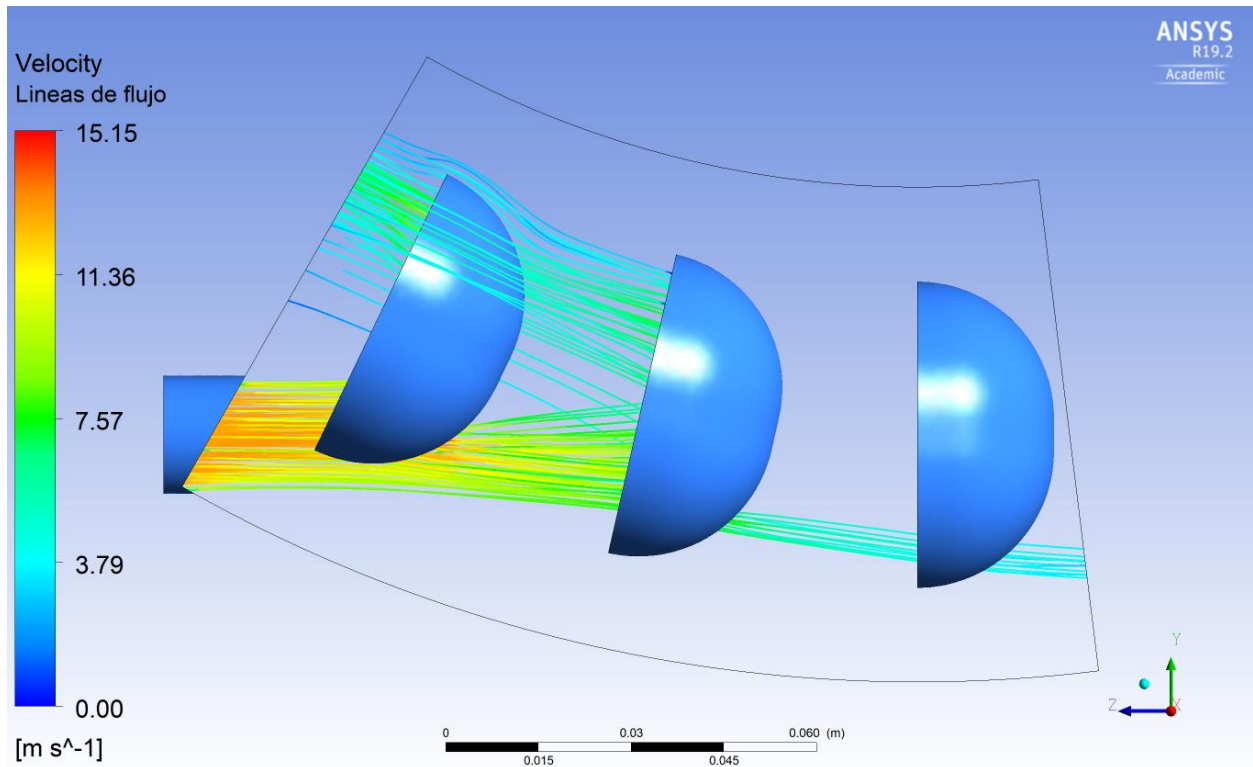


Número de cazoletas_28 *buckets_Nechleba* Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}$, $H_T = 10.0 m$)

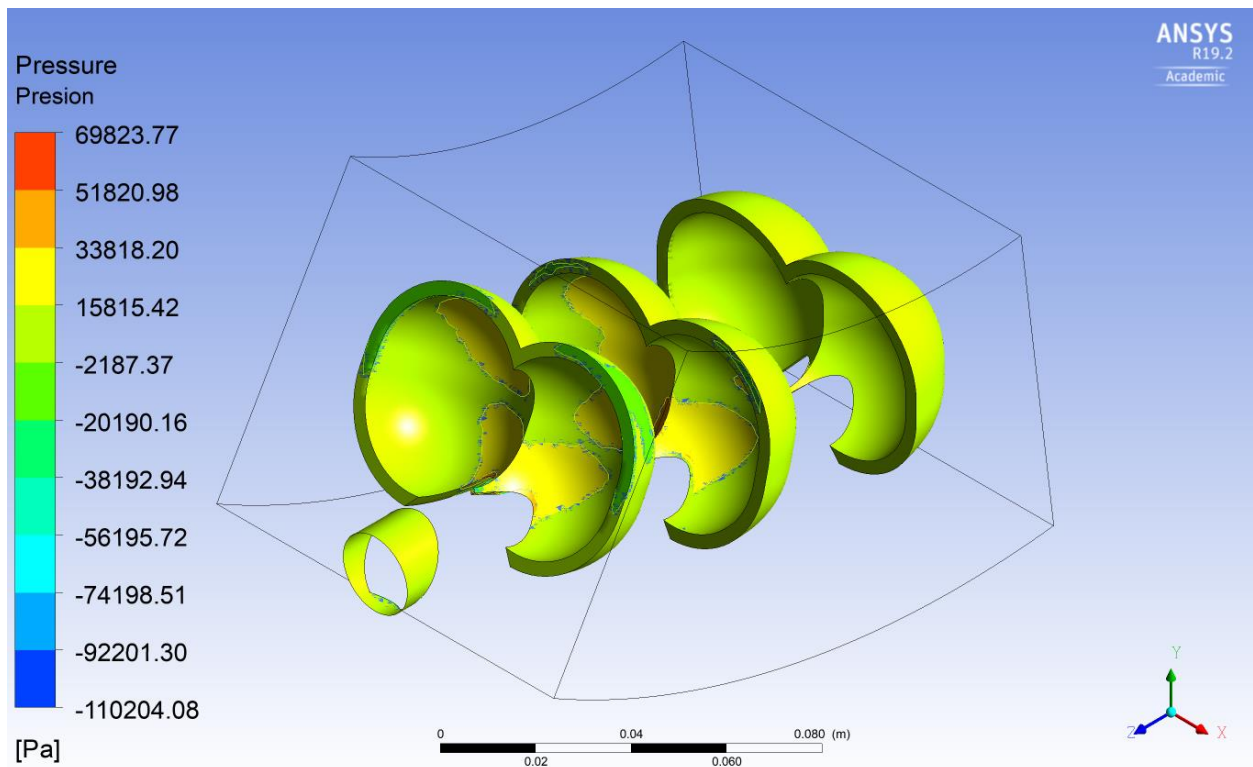
Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista isométrica



Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista lateral

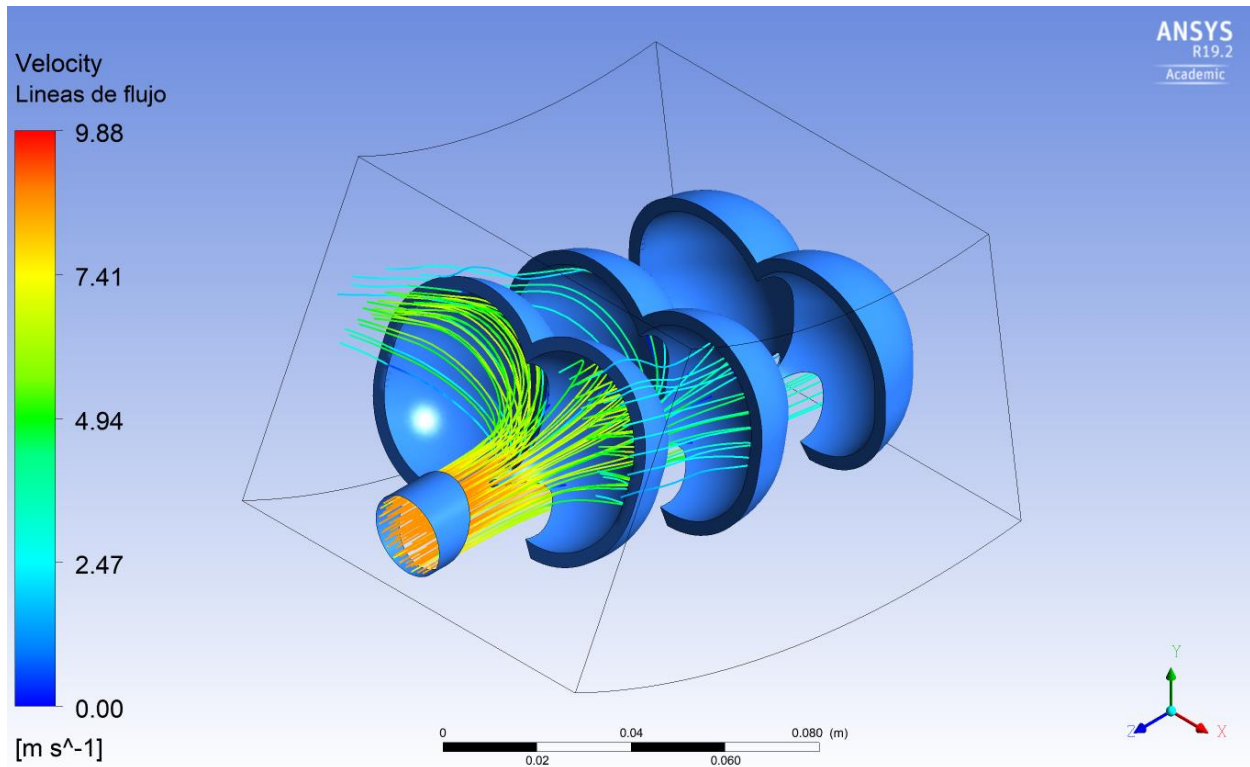


Campo de presión en la superficie de las cazoletas

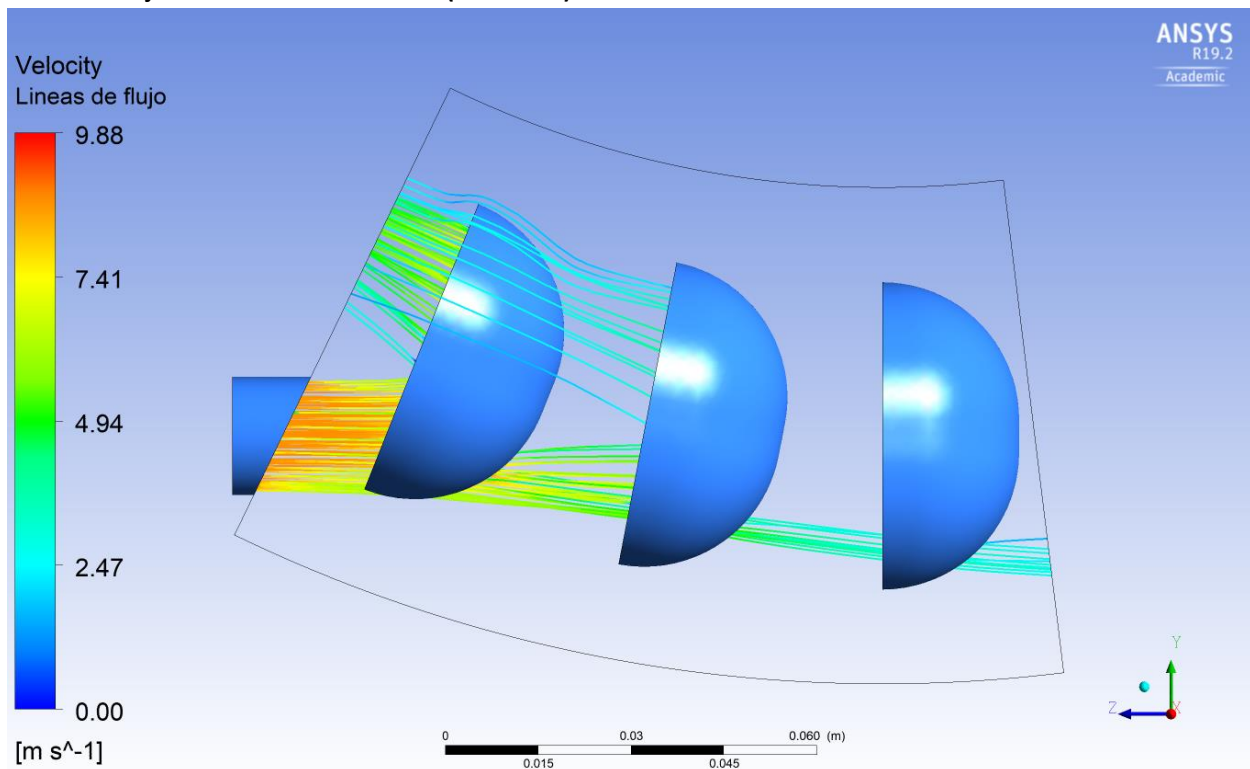


Número de cazoletas_33 *buckets_Einsering* Escenario mínimo ($\bar{V}_{jet} = 8.64 \frac{m}{s}$, $H_T = 4.5 m$)

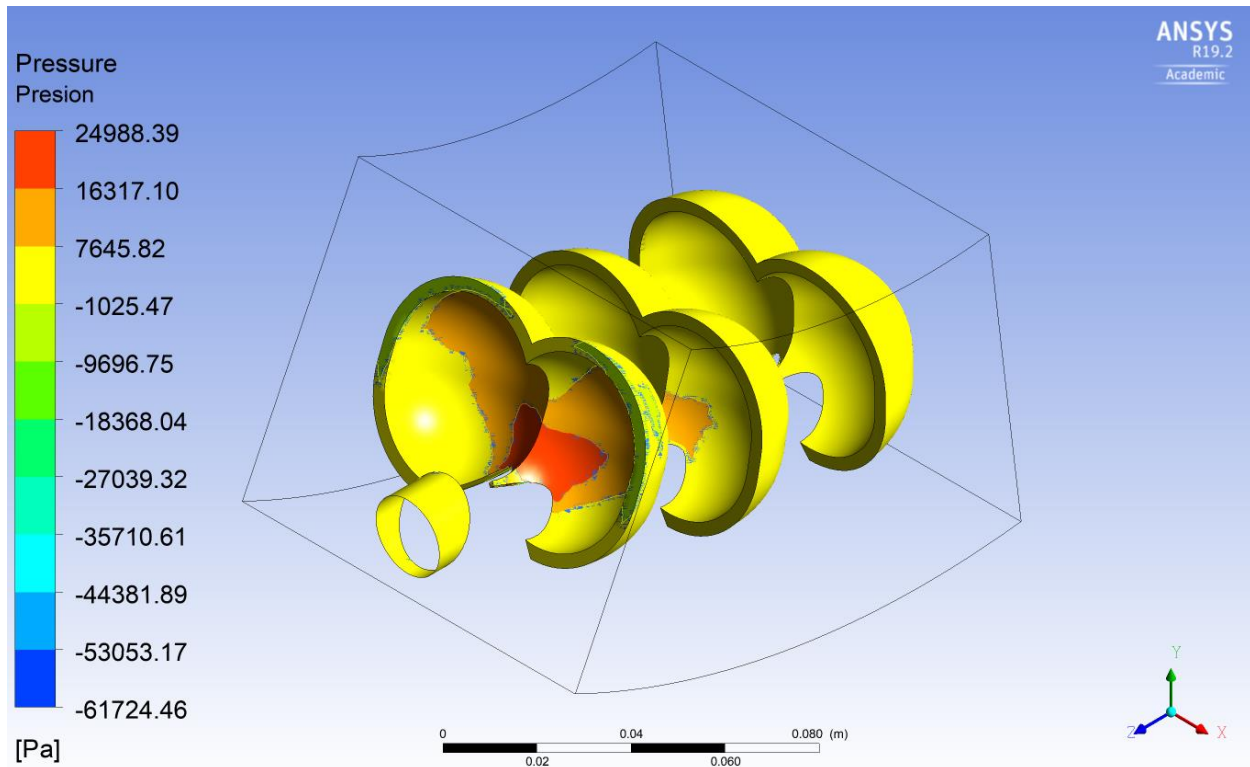
Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista isométrica



Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista lateral

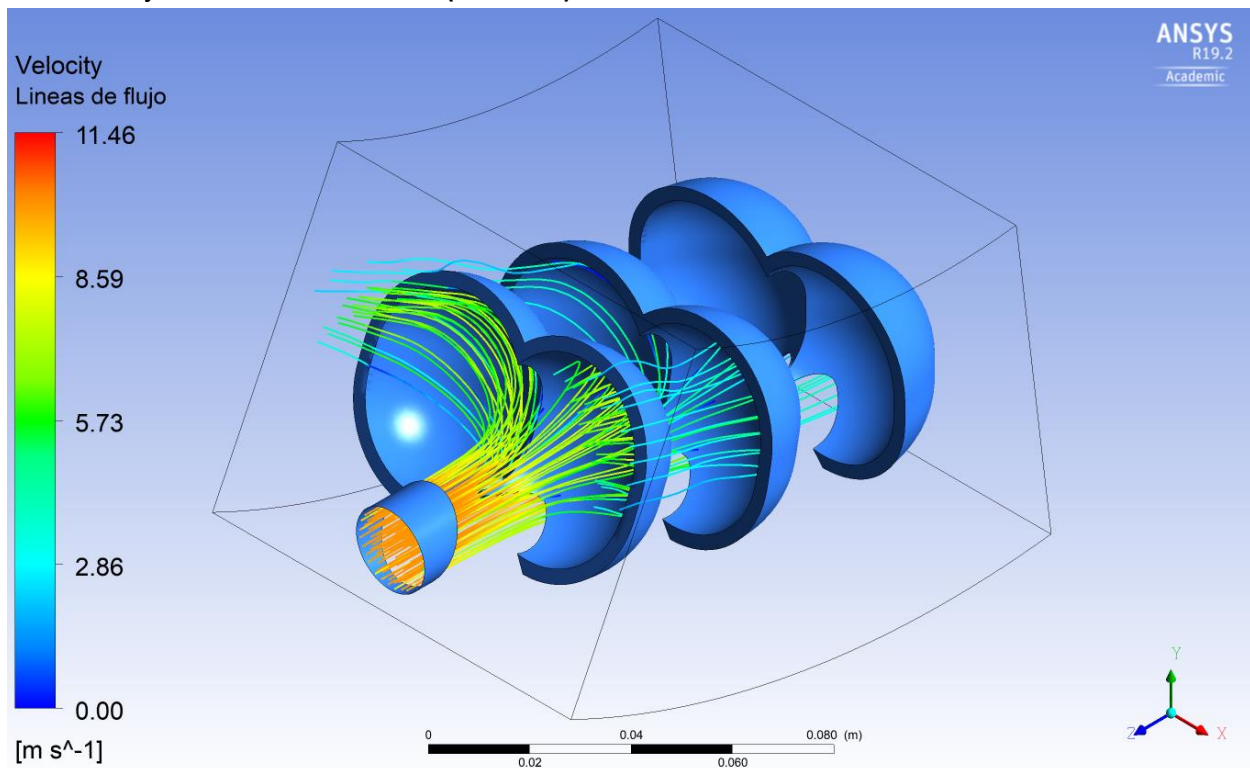


Campo de presión en la superficie de las cazoletas

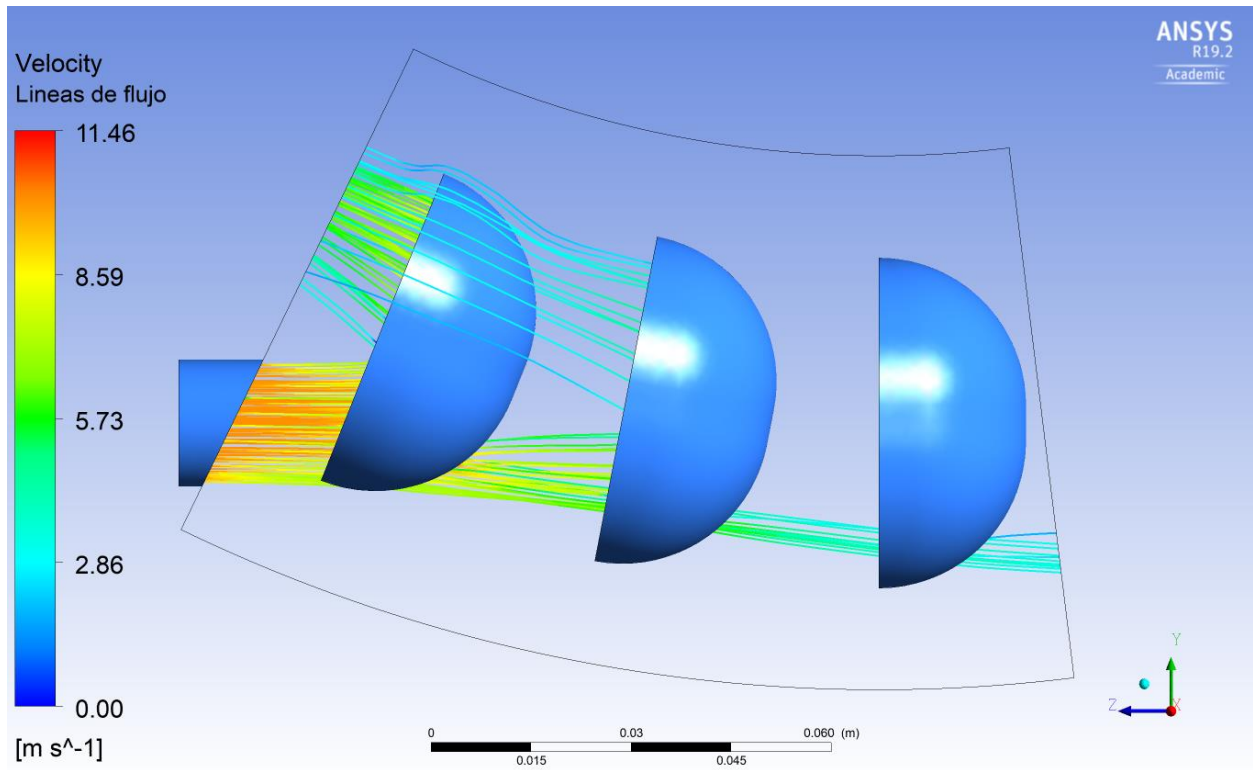


Número de cazoletas_33 *buckets_Einsering* Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$)

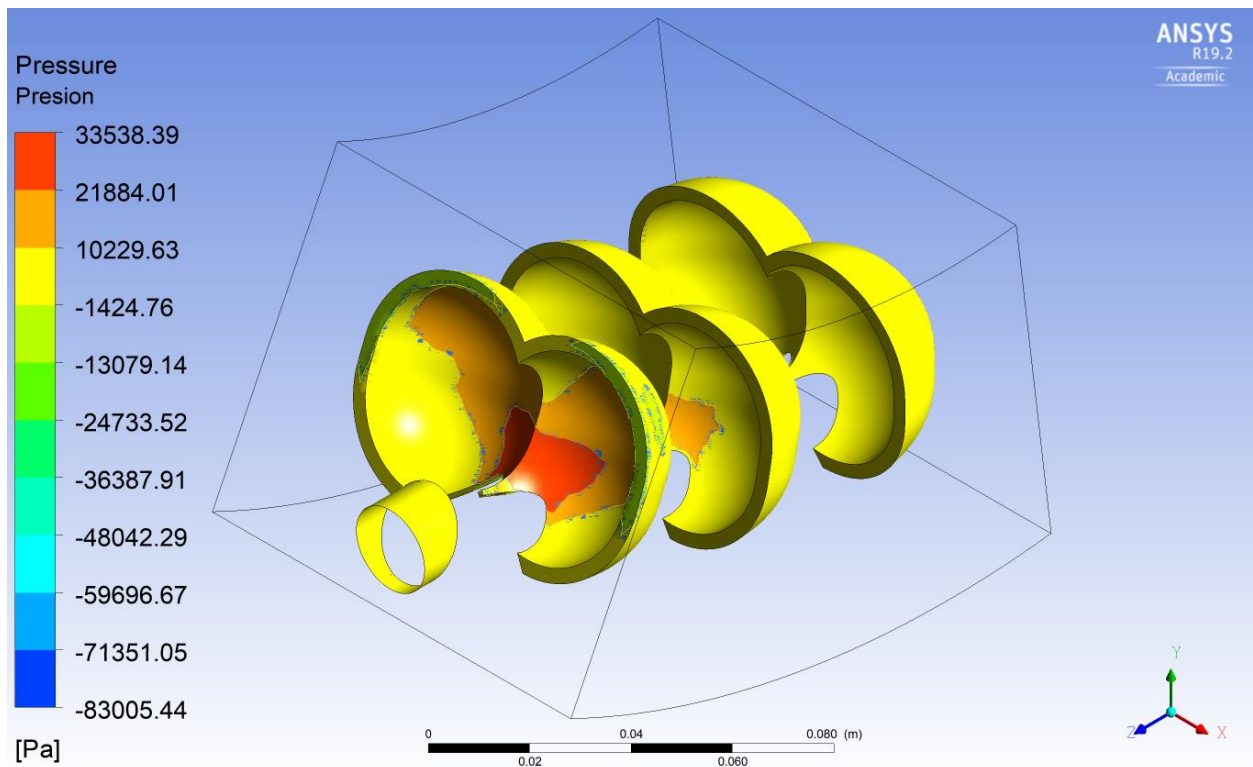
Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista isométrica



Líneas de flujo a través de las cazoletas (Velocidad) – Vista lateral



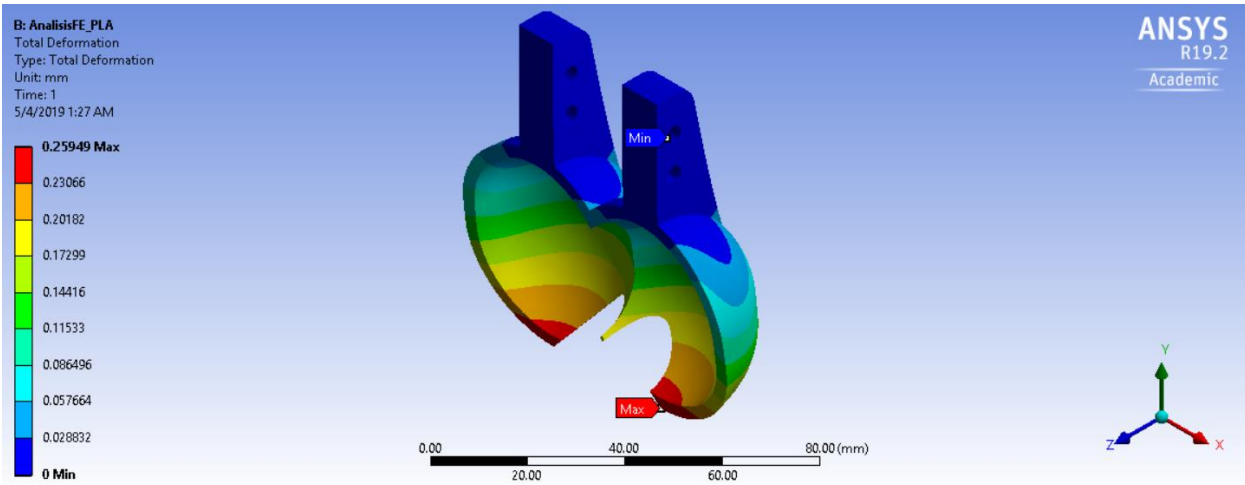
Campo de presión en la superficie de las cazoletas



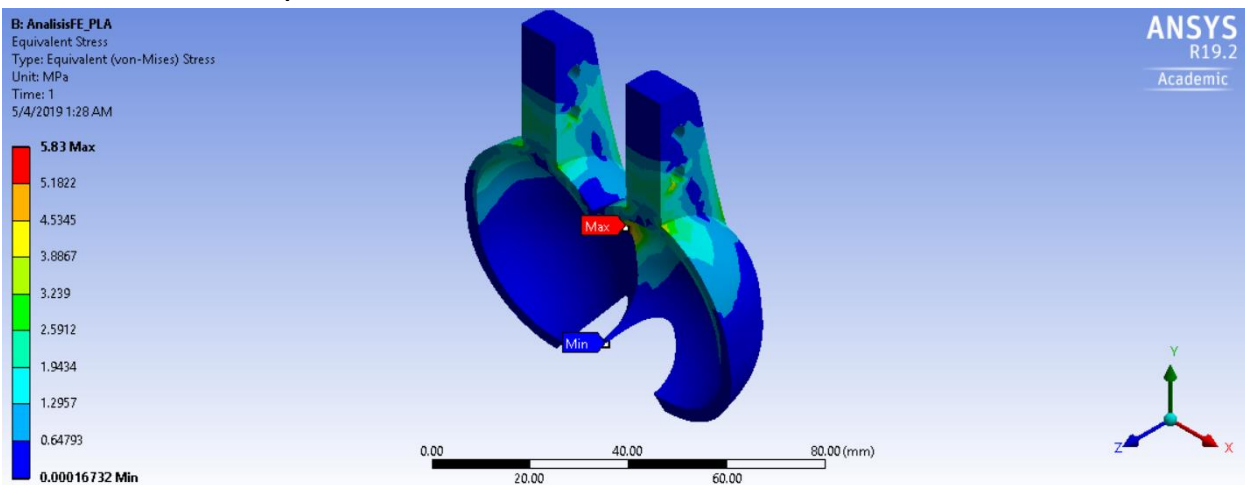
Anexo 4. Análisis Fluido-Estructura de la cazoleta

Evaluación de cazoleta considerando PLA – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}, H_T = 6.0 m$)

Análisis de deformación

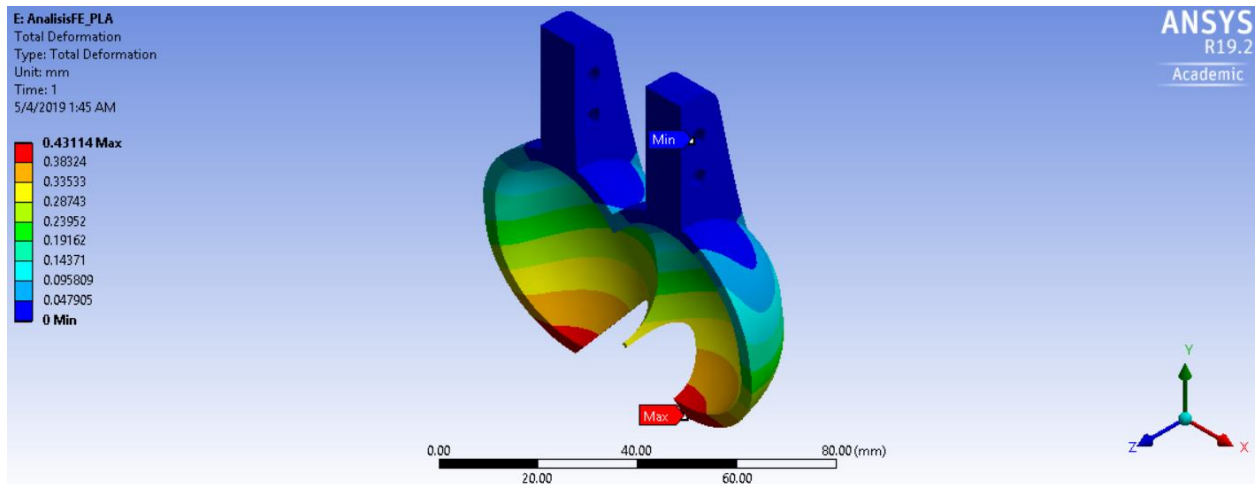


Estimación de esfuerzo equivalente

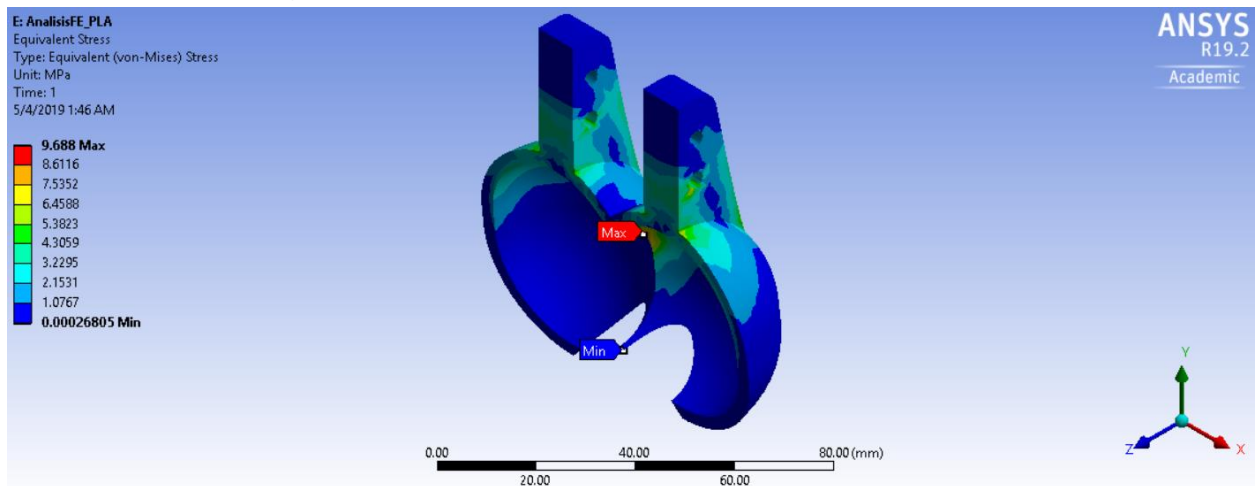


Evaluación de cazoleta considerando PLA – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}, H_T = 10.0 m$)

Análisis de deformación

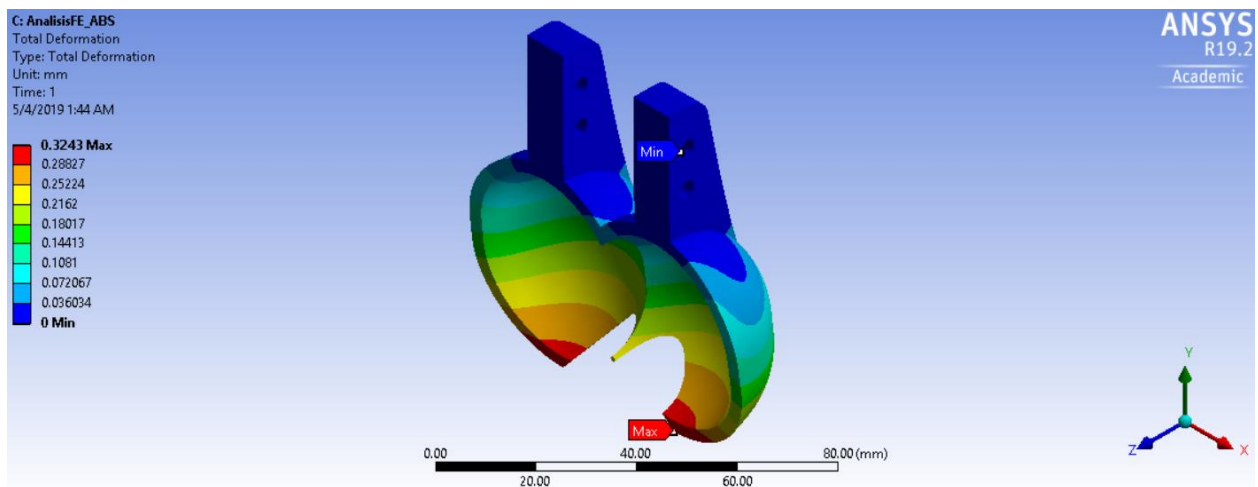


Estimación de esfuerzo equivalente

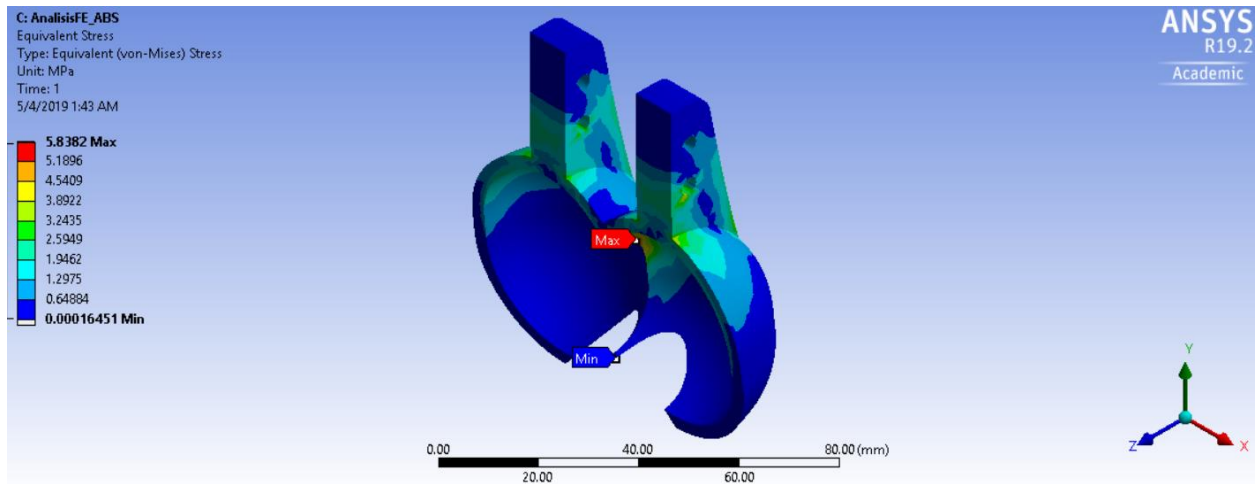


Evaluación de cazoleta considerando ABS – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}$, $H_T = 6.0 m$)

Análisis de deformación

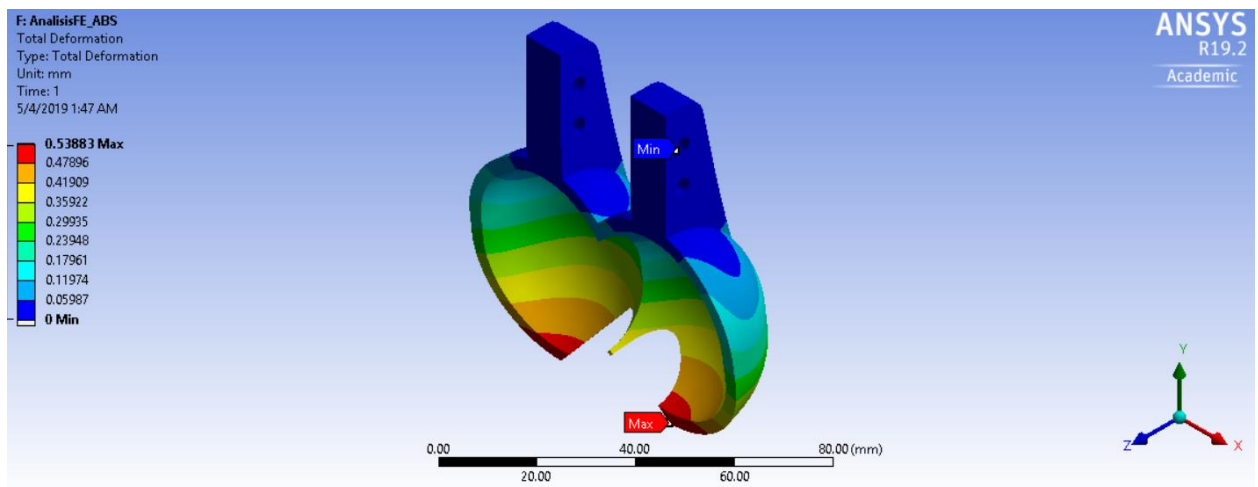


Estimación de esfuerzo equivalente

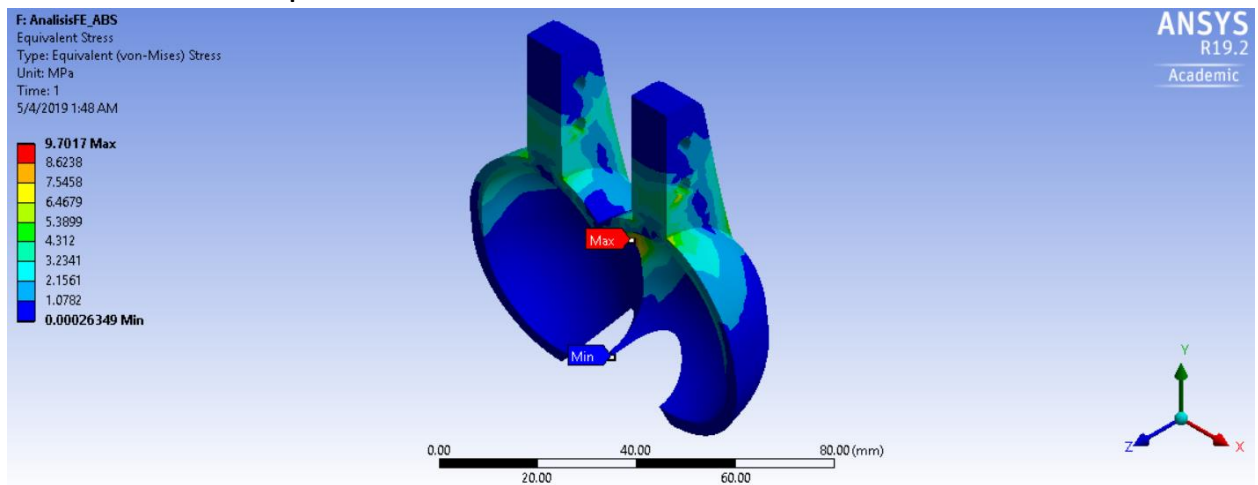


Evaluación de cazoleta considerando ABS – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}$, $H_T = 10.0 m$)

Análisis de deformación

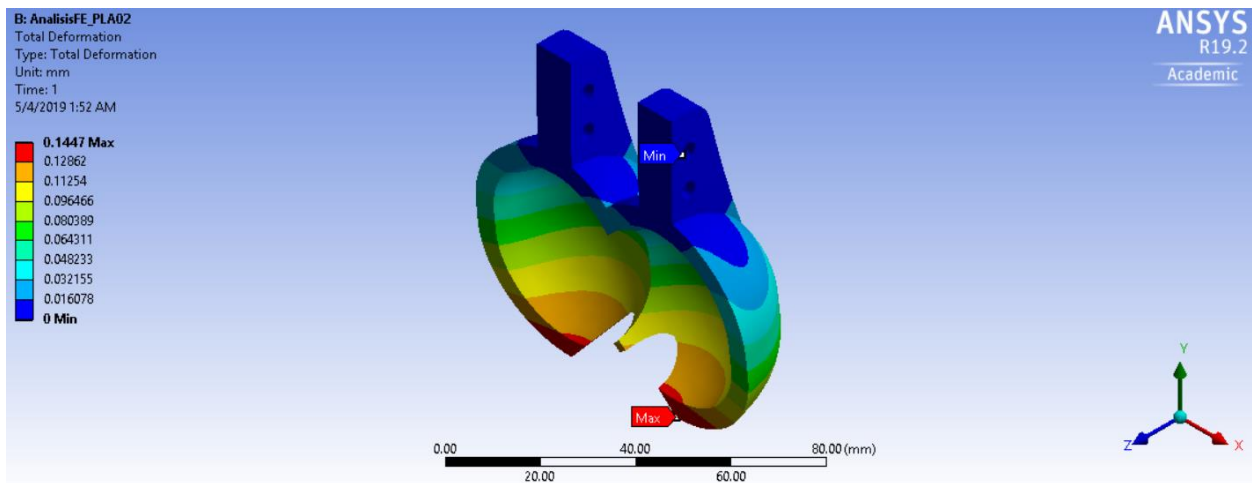


Estimación de esfuerzo equivalente

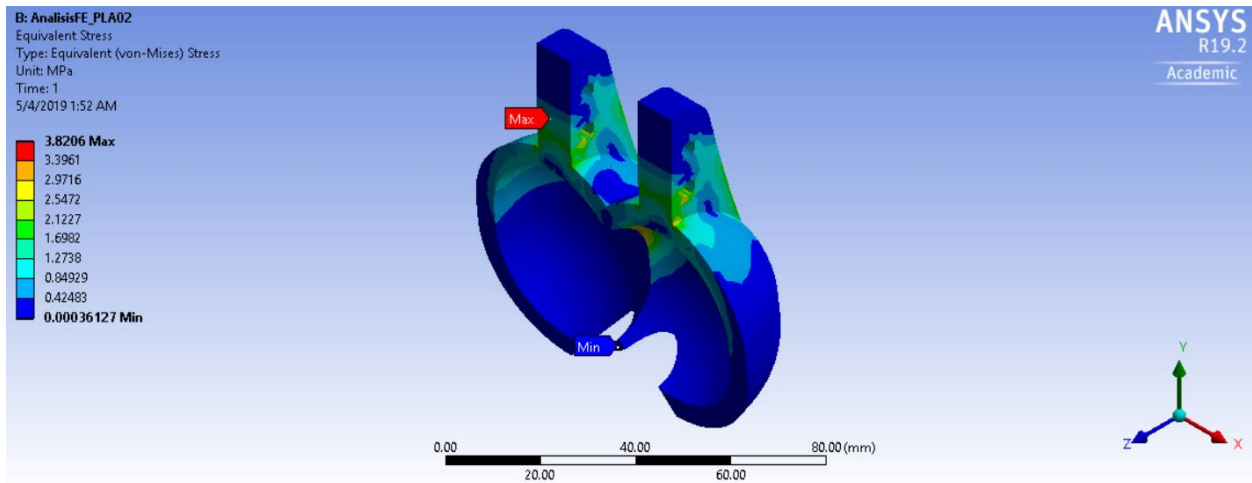


Evaluación de cazoleta modificada considerando PLA – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}, H_T = 6.0 m$)

Análisis de deformación

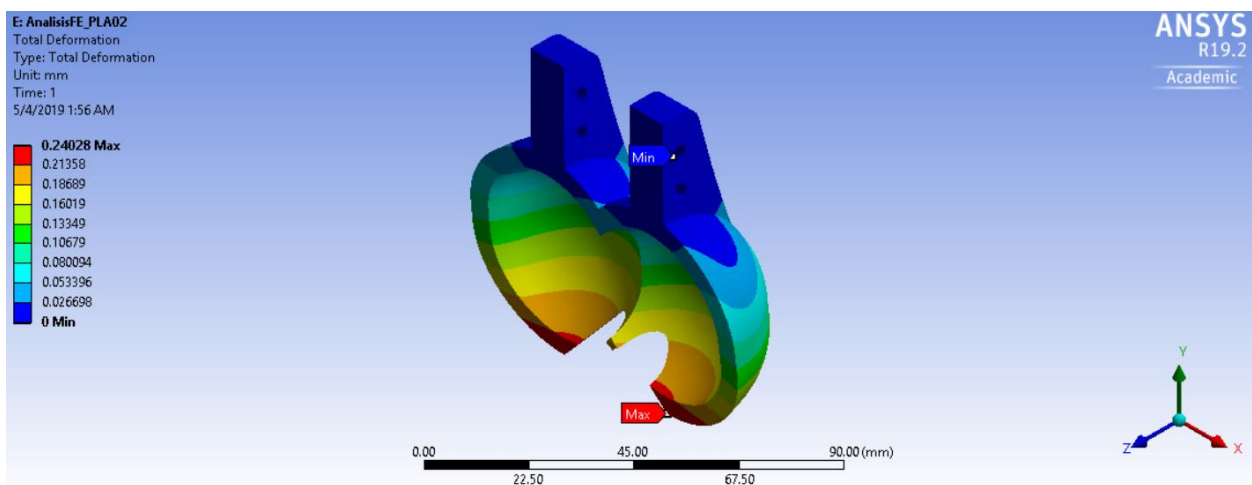


Estimación de esfuerzo equivalente

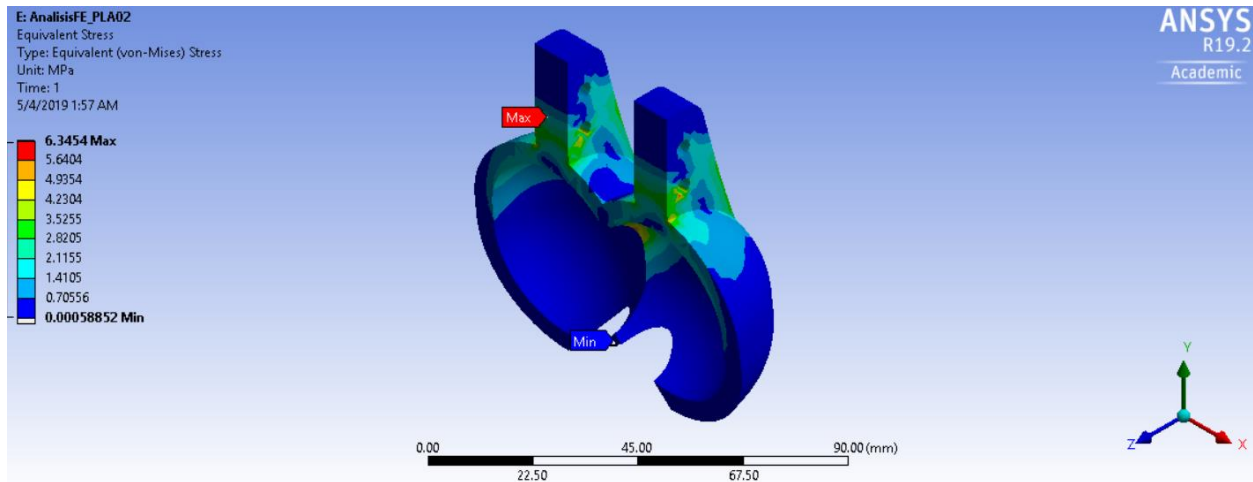


Evaluación de cazoleta modificada considerando PLA – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}, H_T = 10.0 m$)

Análisis de deformación

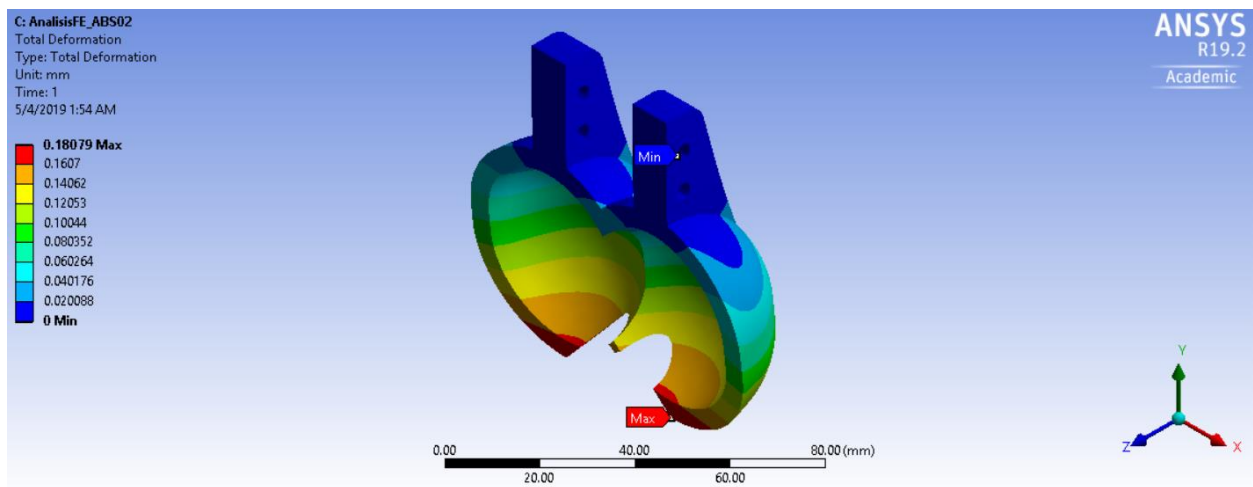


Estimación de esfuerzo equivalente

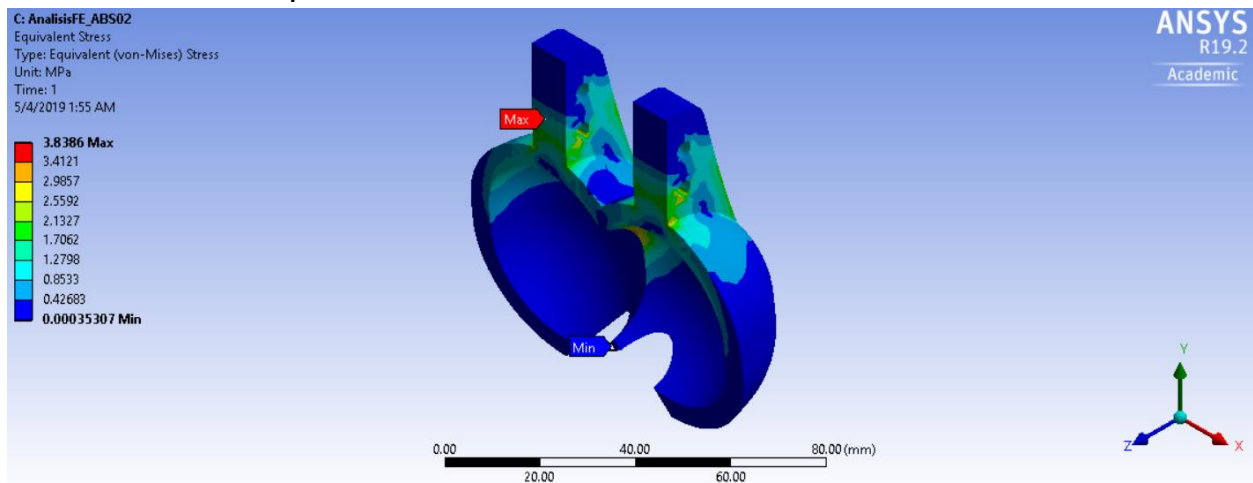


Evaluación de cazoleta modificada considerando ABS – Escenario medio ($\bar{V}_{jet} = 10.01 \frac{m}{s}, H_T = 6.0 m$)

Análisis de deformación

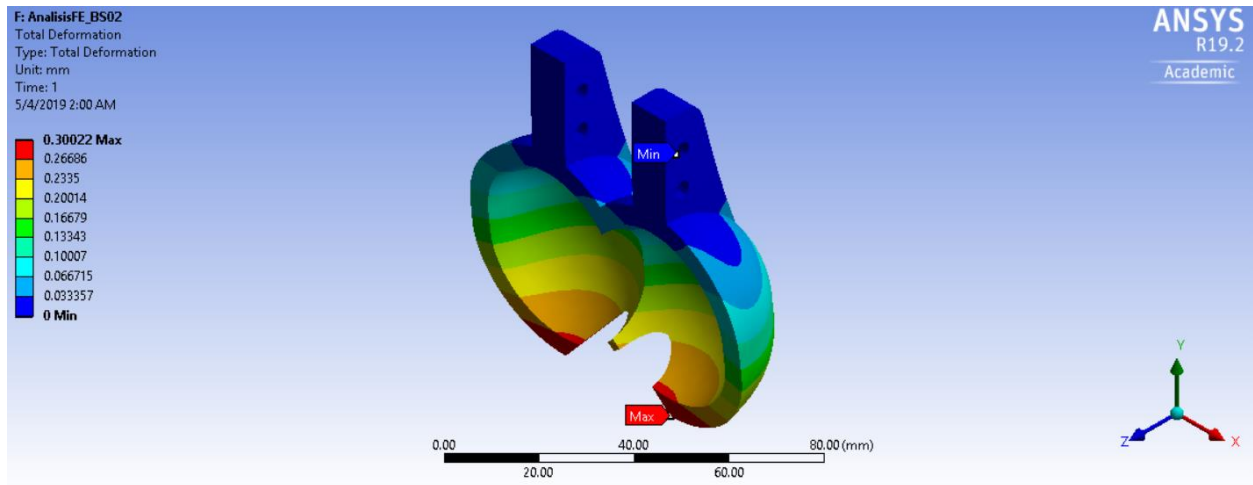


Estimación de esfuerzo equivalente

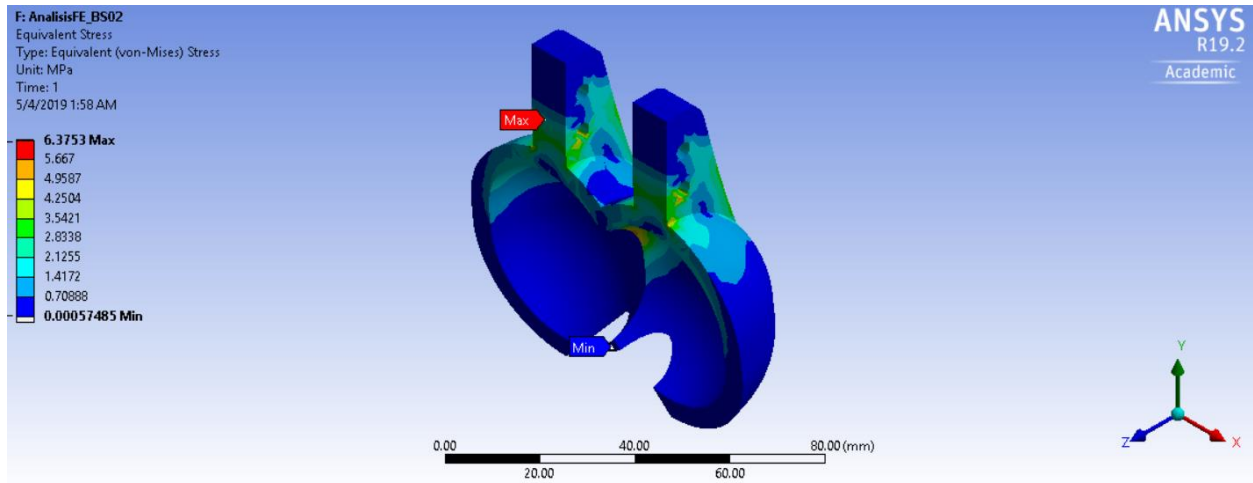


Evaluación de cazoleta modificada considerando ABS – Escenario máximo ($\bar{V}_{jet} = 12.90 \frac{m}{s}, H_T = 10.0 m$)

Análisis de deformación



Estimación de esfuerzo equivalente



Anexo 5. Resultados obtenidos de pruebas experimentales del sistema

Estimación de eficiencia de la turbina operando con dos boquillas y 3 metros de carga hidráulica

Prueba 1 Dos boquillas										
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [$N \cdot m$]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0.00	0.00	0.00	2.01	0.00	3.00	-	-	-
1	4	25.13	5.03	1.44	2.01	0.11	2.89	59.14	36.30	0.6139
2	4	25.13	5.03	1.44	1.97	0.11	2.78	56.97	36.30	0.6373
3	4	25.13	5.03	1.44	1.93	0.11	2.67	53.78	36.30	0.6751
4	4	25.13	5.03	1.44	1.90	0.11	2.57	50.69	36.30	0.7162
5	4	25.13	5.03	1.44	1.86	0.10	2.46	47.72	36.30	0.7607
6	3	18.85	3.77	0.81	1.82	0.10	2.36	44.87	15.32	0.3413
7	4	25.13	5.03	1.44	1.78	0.10	2.26	42.13	36.30	0.8616
8	3	18.85	3.77	0.81	1.74	0.10	2.16	39.51	15.32	0.3877
9	3	18.85	3.77	0.81	1.71	0.10	2.07	36.99	15.32	0.4140
10	3	18.85	3.77	0.81	1.67	0.09	1.97	34.58	15.32	0.4429
11	3	18.85	3.77	0.81	1.63	0.09	1.88	32.28	15.32	0.4745
12	3	18.85	3.77	0.81	1.59	0.09	1.79	30.08	15.32	0.5092
13	3	18.85	3.77	0.81	1.55	0.09	1.70	27.98	15.32	0.5474
14	3	18.85	3.77	0.81	1.51	0.09	1.62	25.98	15.32	0.5896
15	2	12.57	2.52	0.36	1.48	0.08	1.54	24.07	4.54	0.1885
16	3	18.85	3.77	0.81	1.44	0.08	1.46	22.26	15.32	0.6880
17	2	12.57	2.52	0.36	1.40	0.08	1.38	20.54	4.54	0.2209
18	2	12.57	2.52	0.36	1.36	0.08	1.30	18.91	4.54	0.2400
19	2	12.57	2.52	0.36	1.32	0.07	1.23	17.36	4.54	0.2613
20	2	12.57	2.52	0.36	1.28	0.07	1.15	15.91	4.54	0.2853
21	2	12.57	2.52	0.36	1.25	0.07	1.08	14.53	4.54	0.3124
22	1	6.28	1.26	0.09	1.21	0.07	1.01	13.23	0.57	0.0429
23	2	12.57	2.52	0.36	1.17	0.07	0.95	12.01	4.54	0.3778
24	1	6.28	1.26	0.09	1.13	0.06	0.88	10.87	0.57	0.0522
25	1	6.28	1.26	0.09	1.09	0.06	0.82	9.80	0.57	0.0579
26	1	6.28	1.26	0.09	1.05	0.06	0.76	8.80	0.57	0.0645
27	1	6.28	1.26	0.09	1.01	0.06	0.70	7.87	0.57	0.0721
28	1	6.28	1.26	0.09	0.97	0.06	0.65	7.00	0.57	0.0810
29	1	6.28	1.26	0.09	0.93	0.05	0.60	6.20	0.57	0.0915
30	1	6.28	1.26	0.09	0.90	0.05	0.54	5.46	0.57	0.1038

Prueba 2 Dos boquillas										
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{v}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0.00	0.00	0.00	2.01	0.00	3.00	-	-	-
1	4	25.13	5.03	1.44	2.00	0.11	2.89	59.14	36.30	0.6139
2	4	25.13	5.03	1.44	1.97	0.11	2.78	56.59	36.30	0.6416
3	4	25.13	5.03	1.44	1.93	0.11	2.67	53.79	36.30	0.6749
4	4	25.13	5.03	1.44	1.90	0.11	2.57	50.71	36.30	0.7159
5	4	25.13	5.03	1.44	1.86	0.10	2.46	47.74	36.30	0.7604
6	4	25.13	5.03	1.44	1.82	0.10	2.36	44.89	36.30	0.8087
7	3	18.85	3.77	0.81	1.78	0.10	2.26	42.15	15.32	0.3633
8	3	18.85	3.77	0.81	1.74	0.10	2.16	39.53	15.32	0.3875
9	4	25.13	5.03	1.44	1.71	0.10	2.07	37.01	36.30	0.9809
10	3	18.85	3.77	0.81	1.67	0.09	1.97	34.60	15.32	0.4427
11	2	12.57	2.52	0.36	1.63	0.09	1.88	32.30	4.54	0.1405
12	3	18.85	3.77	0.81	1.59	0.09	1.79	30.09	15.32	0.5089
13	3	18.85	3.77	0.81	1.55	0.09	1.71	27.99	15.32	0.5471
14	3	18.85	3.77	0.81	1.52	0.09	1.62	25.99	15.32	0.5893
15	2	12.57	2.52	0.36	1.48	0.08	1.54	24.09	4.54	0.1884
16	3	18.85	3.77	0.81	1.44	0.08	1.46	22.27	15.32	0.6877
17	2	12.57	2.52	0.36	1.40	0.08	1.38	20.55	4.54	0.2208
18	2	12.57	2.52	0.36	1.36	0.08	1.30	18.92	4.54	0.2399
19	2	12.57	2.52	0.36	1.32	0.07	1.23	17.38	4.54	0.2612
20	2	12.57	2.52	0.36	1.28	0.07	1.15	15.92	4.54	0.2851
21	2	12.57	2.52	0.36	1.25	0.07	1.08	14.54	4.54	0.3122
22	1	6.283	1.26	0.09	1.21	0.07	1.01	13.24	0.57	0.0428
23	2	12.57	2.52	0.36	1.17	0.07	0.95	12.02	4.54	0.3775
24	1	6.283	1.26	0.09	1.13	0.06	0.88	10.88	0.57	0.0522
25	2	12.57	2.52	0.36	1.09	0.06	0.82	9.81	4.54	0.4628
26	1	6.283	1.26	0.09	1.05	0.06	0.76	8.81	0.57	0.0644
27	1	6.283	1.26	0.09	1.01	0.06	0.71	7.87	0.57	0.0720
28	1	6.283	1.26	0.09	0.97	0.06	0.65	7.01	0.57	0.0809
29	0	0	0.00	0.00	0.94	0.05	0.60	6.21	0.00	0.0000
30	1	6.283	1.26	0.09	0.90	0.05	0.54	5.47	0.57	0.1037

Estimación de energía generada por el sistema operando con dos boquillas y 3 metros de carga hidráulica

Prueba 1_Dos boquillas								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido W_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0.00	0.00	-	-	-	-	-
1	2	12.5664	2.52	36.30	6.73	-2.07	0.00	0.0000
2	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
3	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
4	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
5	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
6	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
7	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
8	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
9	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
10	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
11	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
12	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
13	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
14	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
15	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
16	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
17	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
18	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
19	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
20	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
21	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
22	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
23	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
24	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
25	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
26	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
27	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
28	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
29	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
30	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Prueba 2_Dos boquillas								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0.00	0.00	-	-	-	-	-
1	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
2	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
3	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
4	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
5	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
6	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
7	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
8	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
9	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
10	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
11	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
12	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
13	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
14	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
15	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
16	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
17	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
18	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
19	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
20	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
21	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
22	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
23	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
24	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
25	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
26	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
27	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
28	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
29	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
30	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Estimación de eficiencia de la turbina operando con una boquilla y 3 metros de carga hidráulica

Prueba 1_Una boquilla										
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0.00	0.00	0.00	2.01	0.00	3.00	-	-	-
1	5	31.42	6.29	2.26	2.00	0.11	2.89	59.14	70.91	1.1990
2	5	31.42	6.29	2.26	1.97	0.11	2.78	56.59	70.91	1.2531
3	4	25.13	5.03	1.44	1.93	0.11	2.67	53.78	36.30	0.6750
4	5	31.42	6.29	2.26	1.90	0.11	2.57	50.71	70.91	1.3984
5	4	25.13	5.03	1.44	1.86	0.10	2.46	47.74	36.30	0.7605
6	5	31.42	6.29	2.26	1.82	0.10	2.36	44.89	70.91	1.5797
7	4	25.13	5.03	1.44	1.78	0.10	2.26	42.15	36.30	0.8614
8	4	25.13	5.03	1.44	1.74	0.10	2.16	39.52	36.30	0.9186
9	4	25.13	5.03	1.44	1.71	0.10	2.07	37.01	36.30	0.9810
10	3	18.85	3.77	0.81	1.67	0.09	1.97	34.60	15.32	0.4427
11	4	25.13	5.03	1.44	1.63	0.09	1.88	32.29	36.30	1.1242
12	3	18.85	3.77	0.81	1.59	0.09	1.79	30.09	15.32	0.5090
13	4	25.13	5.03	1.44	1.55	0.09	1.71	27.99	36.30	1.2969
14	3	18.85	3.77	0.81	1.51	0.09	1.62	25.99	15.32	0.5893
15	3	18.85	3.77	0.81	1.48	0.08	1.54	24.08	15.32	0.6359
16	3	18.85	3.77	0.81	1.44	0.08	1.46	22.27	15.32	0.6877
17	3	18.85	3.77	0.81	1.40	0.08	1.38	20.55	15.32	0.7452
18	3	18.85	3.77	0.81	1.36	0.08	1.30	18.92	15.32	0.8095
19	3	18.85	3.77	0.81	1.32	0.07	1.23	17.38	15.32	0.8814
20	2	12.57	2.52	0.36	1.28	0.07	1.15	15.92	4.54	0.2851
21	3	18.85	3.77	0.81	1.25	0.07	1.08	14.54	15.32	1.0534
22	2	12.57	2.52	0.36	1.21	0.07	1.02	13.24	4.54	0.3427
23	2	12.57	2.52	0.36	1.17	0.07	0.95	12.02	4.54	0.3775
24	2	12.57	2.52	0.36	1.13	0.06	0.88	10.88	4.54	0.4172
25	2	12.57	2.52	0.36	1.09	0.06	0.82	9.81	4.54	0.4627
26	2	12.57	2.52	0.36	1.05	0.06	0.76	8.81	4.54	0.5153
27	1	6.28	1.26	0.09	1.01	0.06	0.71	7.88	0.57	0.0720
28	2	12.57	2.52	0.36	0.97	0.06	0.65	7.01	4.54	0.6473
29	1	6.28	1.26	0.09	0.94	0.05	0.60	6.21	0.57	0.0913
30	1	6.28	1.26	0.09	0.90	0.05	0.55	5.47	0.57	0.1037
31	1	6.28	1.26	0.09	0.86	0.05	0.50	4.79	0.57	0.1184
32	1	6.28	1.26	0.09	0.82	0.05	0.45	4.17	0.57	0.1361
33	1	6.28	1.26	0.09	0.78	0.04	0.40	3.60	0.57	0.1576
34	1	6.28	1.26	0.09	0.74	0.04	0.36	3.08	0.57	0.1840
35	0	0.00	0.00	0.00	0.70	0.04	0.32	2.62	0.00	0.0000
36	1	6.28	1.26	0.09	0.66	0.04	0.28	2.20	0.57	0.2581
37	0	0.00	0.00	0.00	0.62	0.04	0.25	1.82	0.00	0.0000
38	1	6.28	1.26	0.09	0.58	0.03	0.21	1.49	0.57	0.3795

Prueba 2 Una boquilla										
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0.00	0.00	0.00	2.01	0.00	3.00	-	-	-
1	3	18.85	3.77	0.81	2.00	0.11	2.89	59.14	15.32	0.2590
2	5	31.42	6.29	2.26	1.97	0.11	2.78	56.59	70.91	1.2531
3	5	31.42	6.29	2.26	1.93	0.11	2.67	53.79	70.91	1.3181
4	4	25.13	5.03	1.44	1.90	0.11	2.57	50.71	36.30	0.7159
5	5	31.42	6.29	2.26	1.86	0.10	2.46	47.74	70.91	1.4851
6	4	25.13	5.03	1.44	1.82	0.10	2.36	44.89	36.30	0.8087
7	4	25.13	5.03	1.44	1.78	0.10	2.26	42.15	36.30	0.8613
8	4	25.13	5.03	1.44	1.74	0.10	2.16	39.53	36.30	0.9185
9	4	25.13	5.03	1.44	1.71	0.10	2.07	37.01	36.30	0.9809
10	4	25.13	5.03	1.44	1.67	0.09	1.97	34.60	36.30	1.0493
11	4	25.13	5.03	1.44	1.63	0.09	1.88	32.30	36.30	1.1241
12	3	18.85	3.77	0.81	1.59	0.09	1.79	30.09	15.32	0.5089
13	4	25.13	5.03	1.44	1.55	0.09	1.71	27.99	36.30	1.2969
14	3	18.85	3.77	0.81	1.52	0.09	1.62	25.99	15.32	0.5893
15	3	18.85	3.77	0.81	1.48	0.08	1.54	24.09	15.32	0.6359
16	3	18.85	3.77	0.81	1.44	0.08	1.46	22.27	15.32	0.6877
17	3	18.85	3.77	0.81	1.40	0.08	1.38	20.55	15.32	0.7452
18	3	18.85	3.77	0.81	1.36	0.08	1.30	18.92	15.32	0.8095
19	3	18.85	3.77	0.81	1.32	0.07	1.23	17.38	15.32	0.8815
20	2	12.57	2.52	0.36	1.28	0.07	1.15	15.92	4.54	0.2851
21	3	18.85	3.77	0.81	1.25	0.07	1.08	14.54	15.32	1.0535
22	2	12.57	2.52	0.36	1.21	0.07	1.01	13.24	4.54	0.3428
23	2	12.57	2.52	0.36	1.17	0.07	0.95	12.02	4.54	0.3775
24	2	12.57	2.52	0.36	1.13	0.06	0.88	10.88	4.54	0.4172
25	2	12.57	2.52	0.36	1.09	0.06	0.82	9.81	4.54	0.4628
26	2	12.57	2.52	0.36	1.05	0.06	0.76	8.81	4.54	0.5154
27	1	6.283	1.26	0.09	1.01	0.06	0.71	7.87	0.57	0.0720
28	2	12.57	2.52	0.36	0.97	0.06	0.65	7.01	4.54	0.6475
29	1	6.283	1.26	0.09	0.94	0.05	0.60	6.21	0.57	0.0914
30	1	6.283	1.26	0.09	0.90	0.05	0.54	5.47	0.57	0.1037
31	1	6.283	1.26	0.09	0.86	0.05	0.50	4.79	0.57	0.1185
32	1	6.283	1.26	0.09	0.82	0.05	0.45	4.16	0.57	0.1362
33	1	6.283	1.26	0.09	0.78	0.04	0.40	3.60	0.57	0.1577
34	1	6.283	1.26	0.09	0.74	0.04	0.36	3.08	0.57	0.1841
35	0	0	0.00	0.00	0.70	0.04	0.32	2.61	0.00	0.0000
36	1	6.283	1.26	0.09	0.66	0.04	0.28	2.20	0.57	0.2583
37	0	0	0.00	0.00	0.62	0.04	0.25	1.82	0.00	0.0000
38	1	6.283	1.26	0.09	0.58	0.03	0.21	1.49	0.57	0.3799

Estimación de energía generada por el sistema operando con una boquilla y 3 metros de carga hidráulica

Prueba 1 Una boquilla								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0.00	0.00	-	-	-	-	-
1	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
2	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
3	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
4	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
5	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
6	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
7	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
8	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
9	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
10	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
11	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
12	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
13	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
14	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
15	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
16	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
17	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
18	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
19	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
20	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
21	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
22	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
23	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
24	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
25	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
26	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
27	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
28	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
29	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
30	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
31	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
32	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
33	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
34	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
35	0	0.00	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
36	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
37	0	0.00	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
38	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Prueba 2 Una boquilla								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0.00	0.00	-	-	-	-	-
1	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
2	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
3	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
4	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
5	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
6	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
7	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
8	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
9	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
10	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
11	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
12	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
13	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
14	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
15	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
16	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
17	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
18	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
19	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
20	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
21	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
22	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
23	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
24	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
25	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
26	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
27	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
28	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
29	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
30	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
31	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
32	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
33	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
34	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
35	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
36	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
37	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
38	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Estimación de eficiencia de la turbina operando con 4.5 metros de carga hidráulica

Prueba 1										
Tiempo [s]	Rps	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	4.50	-	-	-
1	2	12.57	2.52	0.36	2.46	0.13	4.37	108.60	4.54	0.0418
2	5	31.42	6.29	2.26	2.45	0.13	4.23	105.39	70.91	0.6728
3	5	31.42	6.29	2.26	2.41	0.13	4.10	101.63	70.91	0.6977
4	5	31.42	6.29	2.26	2.37	0.13	3.96	96.90	70.91	0.7318
5	5	31.42	6.29	2.26	2.34	0.13	3.83	92.30	70.91	0.7682
6	5	31.42	6.29	2.26	2.30	0.13	3.71	87.85	70.91	0.8071
7	4	25.13	5.03	1.44	2.26	0.13	3.58	83.54	36.30	0.4346
8	5	31.42	6.29	2.26	2.22	0.12	3.46	79.37	70.91	0.8933
9	4	25.13	5.03	1.44	2.18	0.12	3.33	75.34	36.30	0.4818
10	4	25.13	5.03	1.44	2.15	0.12	3.21	71.45	36.30	0.5081
11	4	25.13	5.03	1.44	2.11	0.12	3.10	67.69	36.30	0.5363
12	4	25.13	5.03	1.44	2.07	0.12	2.98	64.06	36.30	0.5667
13	3	18.85	3.77	0.81	2.03	0.11	2.87	60.56	15.32	0.2529
14	4	25.13	5.03	1.44	2.00	0.11	2.76	57.18	36.30	0.6349
15	4	25.13	5.03	1.44	1.96	0.11	2.65	53.94	36.30	0.6731
16	3	18.85	3.77	0.81	1.92	0.11	2.54	50.81	15.32	0.3014
17	3	18.85	3.77	0.81	1.88	0.11	2.43	47.80	15.32	0.3204
18	3	18.85	3.77	0.81	1.84	0.10	2.33	44.91	15.32	0.3410
19	4	25.13	5.03	1.44	1.81	0.10	2.23	42.14	36.30	0.8615
20	3	18.85	3.77	0.81	1.77	0.10	2.13	39.48	15.32	0.3879
21	2	12.57	2.52	0.36	1.73	0.10	2.03	36.93	4.54	0.1229
22	3	18.85	3.77	0.81	1.69	0.09	1.94	34.49	15.32	0.4440
23	3	18.85	3.77	0.81	1.65	0.09	1.85	32.16	15.32	0.4762
24	2	12.57	2.52	0.36	1.61	0.09	1.76	29.93	4.54	0.1516
25	2	12.57	2.52	0.36	1.58	0.09	1.67	27.81	4.54	0.1632
26	3	18.85	3.77	0.81	1.54	0.09	1.58	25.78	15.32	0.5941
27	2	12.57	2.52	0.36	1.50	0.08	1.50	23.85	4.54	0.1903
28	1	6.28	1.26	0.09	1.46	0.08	1.41	22.01	0.57	0.0258
29	2	12.57	2.52	0.36	1.42	0.08	1.33	20.27	4.54	0.2238
30	2	12.57	2.52	0.36	1.38	0.08	1.26	18.62	4.54	0.2437
31	1	6.28	1.26	0.09	1.35	0.08	1.18	17.06	0.57	0.0333
32	1	6.28	1.26	0.09	1.31	0.07	1.11	15.58	0.57	0.0364
33	1	6.28	1.26	0.09	1.27	0.07	1.03	14.19	0.57	0.0400
34	1	6.28	1.26	0.09	1.23	0.07	0.96	12.88	0.57	0.0440
35	1	6.28	1.26	0.09	1.19	0.07	0.90	11.65	0.57	0.0487
36	1	6.28	1.26	0.09	1.15	0.07	0.83	10.49	0.57	0.0541
37	1	6.28	1.26	0.09	1.11	0.06	0.77	9.41	0.57	0.0603
38	0	0.00	0.00	0.00	1.08	0.06	0.71	8.41	0.00	0.0000
39	1	6.28	1.26	0.09	1.04	0.06	0.65	7.47	0.57	0.0760
40	1	6.28	1.26	0.09	1.00	0.06	0.59	6.60	0.57	0.0860

Prueba 2										
Tiempo [s]	Rps	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	4.50	-	-	-
1	4	25.13	5.03	1.44	2.46	0.14	4.37	108.70	36.30	0.33
2	6	37.70	7.55	3.25	2.42	0.13	4.23	105.38	122.53	1.16
3	6	37.70	7.55	3.25	2.39	0.13	4.10	100.58	122.53	1.22
4	5	31.42	6.29	2.26	2.35	0.13	3.97	95.91	70.91	0.74
5	6	37.70	7.55	3.25	2.31	0.13	3.84	91.37	122.53	1.34
6	5	31.42	6.29	2.26	2.27	0.13	3.71	86.99	70.91	0.82
7	5	31.42	6.29	2.26	2.23	0.12	3.59	82.74	70.91	0.86
8	5	31.42	6.29	2.26	2.20	0.12	3.46	78.63	70.91	0.90
9	5	31.42	6.29	2.26	2.16	0.12	3.34	74.66	70.91	0.95
10	5	31.42	6.29	2.26	2.12	0.12	3.22	70.82	70.91	1.00
11	5	31.42	6.29	2.26	2.08	0.12	3.11	67.11	70.91	1.06
12	4	25.13	5.03	1.44	2.05	0.11	2.99	63.54	36.30	0.57
13	5	31.42	6.29	2.26	2.01	0.11	2.88	60.09	70.91	1.18
14	4	25.13	5.03	1.44	1.97	0.11	2.77	56.77	36.30	0.64
15	4	25.13	5.03	1.44	1.93	0.11	2.66	53.57	36.30	0.68
16	4	25.13	5.03	1.44	1.89	0.11	2.56	50.49	36.30	0.72
17	4	25.13	5.03	1.44	1.86	0.10	2.45	47.53	36.30	0.76
18	4	25.13	5.03	1.44	1.82	0.10	2.35	44.68	36.30	0.81
19	4	25.13	5.03	1.44	1.78	0.10	2.25	41.95	36.30	0.87
20	3	18.85	3.77	0.81	1.74	0.10	2.16	39.33	15.32	0.39
21	3	18.85	3.77	0.81	1.70	0.10	2.06	36.83	15.32	0.42
22	4	25.13	5.03	1.44	1.67	0.09	1.97	34.42	36.30	1.05
23	3	18.85	3.77	0.81	1.63	0.09	1.88	32.13	15.32	0.48
24	3	18.85	3.77	0.81	1.59	0.09	1.79	29.93	15.32	0.51
25	3	18.85	3.77	0.81	1.55	0.09	1.70	27.84	15.32	0.55
26	3	18.85	3.77	0.81	1.51	0.09	1.61	25.85	15.32	0.59
27	2	12.57	2.52	0.36	1.47	0.08	1.53	23.95	4.54	0.19
28	3	18.85	3.77	0.81	1.44	0.08	1.45	22.14	15.32	0.69
29	2	12.57	2.52	0.36	1.40	0.08	1.37	20.43	4.54	0.22
30	3	18.85	3.77	0.81	1.36	0.08	1.30	18.80	15.32	0.81
31	2	12.57	2.52	0.36	1.32	0.07	1.22	17.26	4.54	0.26
32	2	12.57	2.52	0.36	1.28	0.07	1.15	15.81	4.54	0.29
33	2	12.57	2.52	0.36	1.24	0.07	1.08	14.44	4.54	0.31
34	1	6.28	1.26	0.09	1.20	0.07	1.01	13.15	0.57	0.04
35	2	12.57	2.52	0.36	1.17	0.07	0.94	11.93	4.54	0.38
36	1	6.28	1.26	0.09	1.13	0.06	0.88	10.79	0.57	0.05
37	2	12.57	2.52	0.36	1.09	0.06	0.82	9.73	4.54	0.47
38	1	6.28	1.26	0.09	1.05	0.06	0.76	8.73	0.57	0.06
39	1	6.28	1.26	0.09	1.01	0.06	0.70	7.81	0.57	0.07
40	1	6.28	1.26	0.09	0.97	0.06	0.65	6.95	0.57	0.08
41	1	6.28	1.26	0.09	0.93	0.05	0.59	6.15	0.57	0.09
42	0	0.00	0.00	0.00	0.89	0.05	0.54	5.42	0.00	0.00
43	1	6.28	1.26	0.09	0.85	0.05	0.49	4.74	0.57	0.12
44	1	6.28	1.26	0.09	0.81	0.05	0.45	4.12	0.57	0.14

Prueba 3										
Tiempo [s]	Rps	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	4.50	-	-	-
1	1	6.283	1.26	0.09	2.46	0.14	4.37	108.70	0.57	0.01
2	4	25.13	5.03	1.44	2.42	0.13	4.23	105.38	36.30	0.34
3	6	37.7	7.55	3.25	2.39	0.13	4.10	100.58	122.53	1.22
4	6	37.7	7.55	3.25	2.35	0.13	3.97	95.91	122.53	1.28
5	5	31.42	6.29	2.26	2.31	0.13	3.84	91.37	70.91	0.78
6	6	37.7	7.55	3.25	2.27	0.13	3.71	86.99	122.53	1.41
7	5	31.42	6.29	2.26	2.23	0.12	3.59	82.74	70.91	0.86
8	5	31.42	6.29	2.26	2.20	0.12	3.46	78.63	70.91	0.90
9	5	31.42	6.29	2.26	2.16	0.12	3.34	74.66	70.91	0.95
10	5	31.42	6.29	2.26	2.12	0.12	3.22	70.82	70.91	1.00
11	5	31.42	6.29	2.26	2.08	0.12	3.11	67.11	70.91	1.06
12	5	31.42	6.29	2.26	2.05	0.11	2.99	63.54	70.91	1.12
13	4	25.13	5.03	1.44	2.01	0.11	2.88	60.09	36.30	0.60
14	5	31.42	6.29	2.26	1.97	0.11	2.77	56.77	70.91	1.25
15	4	25.13	5.03	1.44	1.93	0.11	2.66	53.57	36.30	0.68
16	4	25.13	5.03	1.44	1.89	0.11	2.56	50.49	36.30	0.72
17	4	25.13	5.03	1.44	1.86	0.10	2.45	47.53	36.30	0.76
18	4	25.13	5.03	1.44	1.82	0.10	2.35	44.68	36.30	0.81
19	4	25.13	5.03	1.44	1.78	0.10	2.25	41.95	36.30	0.87
20	4	25.13	5.03	1.44	1.74	0.10	2.16	39.33	36.30	0.92
21	3	18.85	3.77	0.81	1.70	0.10	2.06	36.83	15.32	0.42
22	4	25.13	5.03	1.44	1.67	0.09	1.97	34.42	36.30	1.05
23	3	18.85	3.77	0.81	1.63	0.09	1.88	32.13	15.32	0.48
24	3	18.85	3.77	0.81	1.59	0.09	1.79	29.93	15.32	0.51
25	3	18.85	3.77	0.81	1.55	0.09	1.70	27.84	15.32	0.55
26	3	18.85	3.77	0.81	1.51	0.09	1.61	25.85	15.32	0.59
27	3	18.85	3.77	0.81	1.47	0.08	1.53	23.95	15.32	0.64
28	3	18.85	3.77	0.81	1.44	0.08	1.45	22.14	15.32	0.69
29	2	12.57	2.52	0.36	1.40	0.08	1.37	20.43	4.54	0.22
30	3	18.85	3.77	0.81	1.36	0.08	1.30	18.80	15.32	0.81
31	2	12.57	2.52	0.36	1.32	0.07	1.22	17.26	4.54	0.26
32	2	12.57	2.52	0.36	1.28	0.07	1.15	15.81	4.54	0.29
33	2	12.57	2.52	0.36	1.24	0.07	1.08	14.44	4.54	0.31
34	2	12.57	2.52	0.36	1.20	0.07	1.01	13.15	4.54	0.35
35	2	12.57	2.52	0.36	1.17	0.07	0.94	11.93	4.54	0.38
36	1	6.283	1.26	0.09	1.13	0.06	0.88	10.79	0.57	0.05
37	2	12.57	2.52	0.36	1.09	0.06	0.82	9.73	4.54	0.47
38	1	6.283	1.26	0.09	1.05	0.06	0.76	8.73	0.57	0.06
39	1	6.283	1.26	0.09	1.01	0.06	0.70	7.81	0.57	0.07
40	1	6.283	1.26	0.09	0.97	0.06	0.65	6.95	0.57	0.08
41	1	6.283	1.26	0.09	0.93	0.05	0.59	6.15	0.57	0.09
42	1	6.283	1.26	0.09	0.89	0.05	0.54	5.42	0.57	0.10
43	1	6.283	1.26	0.09	0.85	0.05	0.49	4.74	0.57	0.12
44	1	6.283	1.26	0.09	0.81	0.05	0.45	4.12	0.57	0.14
45	0	0	0.00	0.00	0.77	0.04	0.40	3.56	0.00	0.00
46	1	6.283	1.26	0.09	0.73	0.04	0.36	3.04	0.57	0.19

Prueba 4										
Tiempo [s]	Rps	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum,i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	4.50	-	-	-
1	2	12.566	2.52	0.36	2.46	0.14	4.37	108.70	4.54	0.04
2	6	37.699	7.55	3.25	2.42	0.13	4.23	105.38	122.53	1.16
3	6	37.699	7.55	3.25	2.39	0.13	4.10	100.58	122.53	1.22
4	5	31.416	6.29	2.26	2.35	0.13	3.97	95.91	70.91	0.74
5	5	31.416	6.29	2.26	2.31	0.13	3.84	91.37	70.91	0.78
6	5	31.416	6.29	2.26	2.27	0.13	3.71	86.99	70.91	0.82
7	5	31.416	6.29	2.26	2.23	0.12	3.59	82.74	70.91	0.86
8	5	31.416	6.29	2.26	2.20	0.12	3.46	78.63	70.91	0.90
9	5	31.416	6.29	2.26	2.16	0.12	3.34	74.66	70.91	0.95
10	5	31.416	6.29	2.26	2.12	0.12	3.22	70.82	70.91	1.00
11	5	31.416	6.29	2.26	2.08	0.12	3.11	67.11	70.91	1.06
12	4	25.133	5.03	1.44	2.05	0.11	2.99	63.54	36.30	0.57
13	4	25.133	5.03	1.44	2.01	0.11	2.88	60.09	36.30	0.60
14	5	31.416	6.29	2.26	1.97	0.11	2.77	56.77	70.91	1.25
15	4	25.133	5.03	1.44	1.93	0.11	2.66	53.57	36.30	0.68
16	4	25.133	5.03	1.44	1.89	0.11	2.56	50.49	36.30	0.72
17	4	25.133	5.03	1.44	1.86	0.10	2.45	47.53	36.30	0.76
18	3	18.85	3.77	0.81	1.82	0.10	2.35	44.68	15.32	0.34
19	4	25.133	5.03	1.44	1.78	0.10	2.25	41.95	36.30	0.87
20	3	18.85	3.77	0.81	1.74	0.10	2.16	39.33	15.32	0.39
21	4	25.133	5.03	1.44	1.70	0.10	2.06	36.83	36.30	0.99
22	3	18.85	3.77	0.81	1.67	0.09	1.97	34.42	15.32	0.44
23	3	18.85	3.77	0.81	1.63	0.09	1.88	32.13	15.32	0.48
24	3	18.85	3.77	0.81	1.59	0.09	1.79	29.93	15.32	0.51
25	3	18.85	3.77	0.81	1.55	0.09	1.70	27.84	15.32	0.55
26	3	18.85	3.77	0.81	1.51	0.09	1.61	25.85	15.32	0.59
27	2	12.566	2.52	0.36	1.47	0.08	1.53	23.95	4.54	0.19
28	3	18.85	3.77	0.81	1.44	0.08	1.45	22.14	15.32	0.69
29	2	12.566	2.52	0.36	1.40	0.08	1.37	20.43	4.54	0.22
30	2	12.566	2.52	0.36	1.36	0.08	1.30	18.80	4.54	0.24
31	3	18.85	3.77	0.81	1.32	0.07	1.22	17.26	15.32	0.89
32	1	6.2832	1.26	0.09	1.28	0.07	1.15	15.81	0.57	0.04
33	2	12.566	2.52	0.36	1.24	0.07	1.08	14.44	4.54	0.31
34	2	12.566	2.52	0.36	1.20	0.07	1.01	13.15	4.54	0.35
35	1	6.2832	1.26	0.09	1.17	0.07	0.94	11.93	0.57	0.05
36	2	12.566	2.52	0.36	1.13	0.06	0.88	10.79	4.54	0.42
37	1	6.2832	1.26	0.09	1.09	0.06	0.82	9.73	0.57	0.06
38	1	6.2832	1.26	0.09	1.05	0.06	0.76	8.73	0.57	0.06
39	1	6.2832	1.26	0.09	1.01	0.06	0.70	7.81	0.57	0.07
40	1	6.2832	1.26	0.09	0.97	0.06	0.65	6.95	0.57	0.08
41	1	6.2832	1.26	0.09	0.93	0.05	0.59	6.15	0.57	0.09
42	0	0	0.00	0.00	0.89	0.05	0.54	5.42	0.00	0.00
43	1	6.2832	1.26	0.09	0.85	0.05	0.49	4.74	0.57	0.12
44	1	6.2832	1.26	0.09	0.81	0.05	0.45	4.12	0.57	0.14

Prueba 5										
Tiempo [s]	Rps	rad/s	Velocidad tangencial \vec{v}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	4.50	-	-	-
1	2	12.6	2.52	0.36	2.46	0.14	4.37	108.70	4.54	0.04
2	6	37.7	7.55	3.25	2.42	0.13	4.23	105.38	122.53	1.16
3	6	37.7	7.55	3.25	2.39	0.13	4.10	100.58	122.53	1.22
4	5	31.4	6.29	2.26	2.35	0.13	3.97	95.91	70.91	0.74
5	6	37.7	7.55	3.25	2.31	0.13	3.84	91.37	122.53	1.34
6	5	31.4	6.29	2.26	2.27	0.13	3.71	86.99	70.91	0.82
7	6	37.7	7.55	3.25	2.23	0.12	3.59	82.74	122.53	1.48
8	5	31.4	6.29	2.26	2.20	0.12	3.46	78.63	70.91	0.90
9	5	31.4	6.29	2.26	2.16	0.12	3.34	74.66	70.91	0.95
10	5	31.4	6.29	2.26	2.12	0.12	3.22	70.82	70.91	1.00
11	4	25.1	5.03	1.44	2.08	0.12	3.11	67.11	36.30	0.54
12	5	31.4	6.29	2.26	2.05	0.11	2.99	63.54	70.91	1.12
13	5	31.4	6.29	2.26	2.01	0.11	2.88	60.09	70.91	1.18
14	4	25.1	5.03	1.44	1.97	0.11	2.77	56.77	36.30	0.64
15	4	25.1	5.03	1.44	1.93	0.11	2.66	53.57	36.30	0.68
16	5	31.4	6.29	2.26	1.89	0.11	2.56	50.49	70.91	1.40
17	4	25.1	5.03	1.44	1.86	0.10	2.45	47.53	36.30	0.76
18	3	18.8	3.77	0.81	1.82	0.10	2.35	44.68	15.32	0.34
19	4	25.1	5.03	1.44	1.78	0.10	2.25	41.95	36.30	0.87
20	4	25.1	5.03	1.44	1.74	0.10	2.16	39.33	36.30	0.92
21	3	18.8	3.77	0.81	1.70	0.10	2.06	36.83	15.32	0.42
22	4	25.1	5.03	1.44	1.67	0.09	1.97	34.42	36.30	1.05
23	3	18.8	3.77	0.81	1.63	0.09	1.88	32.13	15.32	0.48
24	3	18.8	3.77	0.81	1.59	0.09	1.79	29.93	15.32	0.51
25	3	18.8	3.77	0.81	1.55	0.09	1.70	27.84	15.32	0.55
26	3	18.8	3.77	0.81	1.51	0.09	1.61	25.85	15.32	0.59
27	3	18.8	3.77	0.81	1.47	0.08	1.53	23.95	15.32	0.64
28	3	18.8	3.77	0.81	1.44	0.08	1.45	22.14	15.32	0.69
29	2	12.6	2.52	0.36	1.40	0.08	1.37	20.43	4.54	0.22
30	3	18.8	3.77	0.81	1.36	0.08	1.30	18.80	15.32	0.81
31	2	12.6	2.52	0.36	1.32	0.07	1.22	17.26	4.54	0.26
32	2	12.6	2.52	0.36	1.28	0.07	1.15	15.81	4.54	0.29
33	2	12.6	2.52	0.36	1.24	0.07	1.08	14.44	4.54	0.31
34	2	12.6	2.52	0.36	1.20	0.07	1.01	13.15	4.54	0.35
35	2	12.6	2.52	0.36	1.17	0.07	0.94	11.93	4.54	0.38
36	1	6.28	1.26	0.09	1.13	0.06	0.88	10.79	0.57	0.05
37	1	6.28	1.26	0.09	1.09	0.06	0.82	9.73	0.57	0.06
38	2	12.6	2.52	0.36	1.05	0.06	0.76	8.73	4.54	0.52
39	1	6.28	1.26	0.09	1.01	0.06	0.70	7.81	0.57	0.07
40	1	6.28	1.26	0.09	0.97	0.06	0.65	6.95	0.57	0.08
41	1	6.28	1.26	0.09	0.93	0.05	0.59	6.15	0.57	0.09
42	0	0	0.00	0.00	0.89	0.05	0.54	5.42	0.00	0.00
43	1	6.28	1.26	0.09	0.85	0.05	0.49	4.74	0.57	0.12
44	1	6.28	1.26	0.09	0.81	0.05	0.45	4.12	0.57	0.14
45	0	0	0.00	0.00	0.77	0.04	0.40	3.56	0.00	0.00
46	1	6.28	1.26	0.09	0.73	0.04	0.36	3.04	0.57	0.19

Prueba 6										
Tiempo [s]	Rps	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0.00	0.00	0.00	2.46	0.00	4.50	-	-	-
1	1	6.2832	1.26	0.09	2.46	0.14	4.37	108.70	0.57	0.01
2	6	37.699	7.55	3.25	2.42	0.13	4.23	105.38	122.53	1.16
3	5	31.416	6.29	2.26	2.39	0.13	4.10	100.58	70.91	0.70
4	6	37.699	7.55	3.25	2.35	0.13	3.97	95.91	122.53	1.28
5	6	37.699	7.55	3.25	2.31	0.13	3.84	91.37	122.53	1.34
6	5	31.416	6.29	2.26	2.27	0.13	3.71	86.99	70.91	0.82
7	5	31.416	6.29	2.26	2.23	0.12	3.59	82.74	70.91	0.86
8	6	37.699	7.55	3.25	2.20	0.12	3.46	78.63	122.53	1.56
9	5	31.416	6.29	2.26	2.16	0.12	3.34	74.66	70.91	0.95
10	5	31.416	6.29	2.26	2.12	0.12	3.22	70.82	70.91	1.00
11	4	25.133	5.03	1.44	2.08	0.12	3.11	67.11	36.30	0.54
12	5	31.416	6.29	2.26	2.05	0.11	2.99	63.54	70.91	1.12
13	5	31.416	6.29	2.26	2.01	0.11	2.88	60.09	70.91	1.18
14	4	25.133	5.03	1.44	1.97	0.11	2.77	56.77	36.30	0.64
15	4	25.133	5.03	1.44	1.93	0.11	2.66	53.57	36.30	0.68
16	4	25.133	5.03	1.44	1.89	0.11	2.56	50.49	36.30	0.72
17	4	25.133	5.03	1.44	1.86	0.10	2.45	47.53	36.30	0.76
18	4	25.133	5.03	1.44	1.82	0.10	2.35	44.68	36.30	0.81
19	4	25.133	5.03	1.44	1.78	0.10	2.25	41.95	36.30	0.87
20	4	25.133	5.03	1.44	1.74	0.10	2.16	39.33	36.30	0.92
21	3	18.85	3.77	0.81	1.70	0.10	2.06	36.83	15.32	0.42
22	4	25.133	5.03	1.44	1.67	0.09	1.97	34.42	36.30	1.05
23	3	18.85	3.77	0.81	1.63	0.09	1.88	32.13	15.32	0.48
24	3	18.85	3.77	0.81	1.59	0.09	1.79	29.93	15.32	0.51
25	3	18.85	3.77	0.81	1.55	0.09	1.70	27.84	15.32	0.55
26	3	18.85	3.77	0.81	1.51	0.09	1.61	25.85	15.32	0.59
27	3	18.85	3.77	0.81	1.47	0.08	1.53	23.95	15.32	0.64
28	3	18.85	3.77	0.81	1.44	0.08	1.45	22.14	15.32	0.69
29	2	12.566	2.52	0.36	1.40	0.08	1.37	20.43	4.54	0.22
30	3	18.85	3.77	0.81	1.36	0.08	1.30	18.80	15.32	0.81
31	2	12.566	2.52	0.36	1.32	0.07	1.22	17.26	4.54	0.26
32	2	12.566	2.52	0.36	1.28	0.07	1.15	15.81	4.54	0.29
33	2	12.566	2.52	0.36	1.24	0.07	1.08	14.44	4.54	0.31
34	2	12.566	2.52	0.36	1.20	0.07	1.01	13.15	4.54	0.35
35	2	12.566	2.52	0.36	1.17	0.07	0.94	11.93	4.54	0.38
36	1	6.2832	1.26	0.09	1.13	0.06	0.88	10.79	0.57	0.05
37	2	12.566	2.52	0.36	1.09	0.06	0.82	9.73	4.54	0.47
38	1	6.2832	1.26	0.09	1.05	0.06	0.76	8.73	0.57	0.06
39	1	6.2832	1.26	0.09	1.01	0.06	0.70	7.81	0.57	0.07
40	1	6.2832	1.26	0.09	0.97	0.06	0.65	6.95	0.57	0.08
41	1	6.2832	1.26	0.09	0.93	0.05	0.59	6.15	0.57	0.09
42	1	6.2832	1.26	0.09	0.89	0.05	0.54	5.42	0.57	0.10
43	0	0	0.00	0.00	0.85	0.05	0.49	4.74	0.00	0.00
44	1	6.2832	1.26	0.09	0.81	0.05	0.45	4.12	0.57	0.14
45	1	6.2832	1.26	0.09	0.77	0.04	0.40	3.56	0.57	0.16

Estimación de energía generada por el sistema operando con 4.5 metros de carga hidráulica

Prueba 1								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0.00	0.00	-	-	-	-	-
1	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
2	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
3	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
4	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
5	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
6	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
7	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
8	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
9	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
10	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
11	5	31.42	6.29	36.30	17.57	2.24	39.34	1.0837
12	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
13	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
14	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
15	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
16	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
17	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
18	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
19	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
20	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
21	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
22	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
23	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
24	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
25	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
26	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
27	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
28	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
29	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
30	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
31	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
32	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
33	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
34	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
35	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
36	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
37	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
38	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
39	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
40	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Prueba 2								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0.00	0.00	-	-	-	-	-
1	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
2	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
3	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
4	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
5	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
6	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
7	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
8	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
9	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
10	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
11	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
12	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
13	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
14	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
15	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
16	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
17	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
18	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
19	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
20	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
21	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
22	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
23	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
24	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
25	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
26	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
27	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
28	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
29	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
30	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
31	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
32	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
33	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
34	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
35	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
36	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
37	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
38	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
39	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
40	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
41	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
42	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
43	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
44	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Prueba 3								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0.00	0.00	-	-	-	-	-
1	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
2	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
3	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
4	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
5	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
6	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
7	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
8	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
9	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
10	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
11	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
12	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
13	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
14	5	31.42	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
15	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
16	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
17	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
18	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
19	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
20	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
21	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
22	4	25.13	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
23	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
24	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
25	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
26	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
27	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
28	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
29	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
30	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
31	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
32	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
33	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
34	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
35	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
36	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
37	2	12.57	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
38	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
39	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
40	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
41	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
42	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
43	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
44	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
45	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
46	1	6.283	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Prueba 4								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0.00	0.00	-	-	-	-	-
1	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
2	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
3	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
4	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
5	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
6	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
7	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
8	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
9	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
10	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
11	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
12	5	31.416	6.29	36.30	17.57	2.24	39.34	1.0837
13	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
14	4	25.133	5.03	70.91	13.95	0.75	10.50	0.1481
15	5	31.416	6.29	36.30	17.57	2.24	39.34	1.0837
16	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
17	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
18	4	25.133	5.03	15.32	13.95	0.75	10.50	0.6855
19	3	18.85	3.77	36.30	10.34	-0.68	0.00	0.0000
20	4	25.133	5.03	15.32	13.95	0.75	10.50	0.6855
21	3	18.85	3.77	36.30	10.34	-0.68	0.00	0.0000
22	4	25.133	5.03	15.32	13.95	0.75	10.50	0.6855
23	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
24	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
25	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
26	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
27	3	18.85	3.77	4.54	10.34	-0.68	0.00	0.0000
28	2	12.566	2.52	15.32	6.73	-2.07	0.00	0.0000
29	3	18.85	3.77	4.54	10.34	-0.68	0.00	0.0000
30	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
31	2	12.566	2.52	15.32	6.73	-2.07	0.00	0.0000
32	3	18.85	3.77	0.57	10.34	-0.68	0.00	0.0000
33	1	6.2832	1.26	4.54	3.13	-3.41	0.00	0.0000
34	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
35	2	12.566	2.52	0.57	6.73	-2.07	0.00	0.0000
36	1	6.2832	1.26	4.54	3.13	-3.41	0.00	0.0000
37	2	12.566	2.52	0.57	6.73	-2.07	0.00	0.0000
38	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
39	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
40	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
41	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
42	1	6.2832	1.26	0.00	3.13	-3.41	0.00	0.0000
43	0	0	0.00	0.57	-0.48	-4.69	2.23	3.9312
44	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
45	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Prueba 5								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0.00	0.00	-	-	-	-	-
1	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
2	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
3	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
4	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
5	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
6	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
7	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
8	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
9	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
10	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
11	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
12	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
13	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
14	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
15	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
16	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
17	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
18	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
19	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
20	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
21	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
22	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
23	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
24	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
25	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
26	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
27	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
28	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
29	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
30	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
31	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
32	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
33	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
34	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
35	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
36	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
37	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
38	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
39	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
40	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
41	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
42	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
43	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
44	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
45	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
46	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Prueba 6								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0.00	0.00	-	-	-	-	-
1	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
2	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
3	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
4	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
5	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
6	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
7	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
8	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
9	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
10	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
11	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
12	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
13	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
14	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
15	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
16	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
17	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
18	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
19	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
20	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
21	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
22	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
23	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
24	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
25	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
26	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
27	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
28	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
29	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
30	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
31	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
32	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
33	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
34	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
35	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
36	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
37	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
38	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
39	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
40	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
41	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
42	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
43	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
44	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
45	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Estimación de eficiencia de la turbina operando con 6.0 metros de carga hidráulica

Prueba 1										
Tiempo [s]	Rps	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0	0.00	0.00	2.84	0.00	6.00	-	-	-
1	2	12.566	2.52	0.36	2.84	0.16	5.84	167.16	4.54	0.0271
2	6	37.699	7.55	3.25	2.80	0.16	5.69	162.93	122.53	0.7520
3	7	43.982	8.81	4.42	2.77	0.15	5.53	156.51	194.57	1.2431
4	7	43.982	8.81	4.42	2.73	0.15	5.38	150.24	194.57	1.2951
5	6	37.699	7.55	3.25	2.69	0.15	5.23	144.13	122.53	0.8501
6	6	37.699	7.55	3.25	2.65	0.15	5.09	138.19	122.53	0.8866
7	6	37.699	7.55	3.25	2.62	0.15	4.94	132.42	122.53	0.9253
8	6	37.699	7.55	3.25	2.58	0.14	4.80	126.80	122.53	0.9663
9	6	37.699	7.55	3.25	2.54	0.14	4.66	121.35	122.53	1.0097
10	6	37.699	7.55	3.25	2.50	0.14	4.52	116.05	122.53	1.0558
11	6	37.699	7.55	3.25	2.47	0.14	4.38	110.90	122.53	1.1048
12	6	37.699	7.55	3.25	2.43	0.14	4.24	105.91	122.53	1.1569
13	5	31.416	6.29	2.26	2.39	0.13	4.11	101.07	70.91	0.7016
14	5	31.416	6.29	2.26	2.35	0.13	3.98	96.38	70.91	0.7357
15	6	37.699	7.55	3.25	2.31	0.13	3.85	91.83	122.53	1.3343
16	5	31.416	6.29	2.26	2.28	0.13	3.72	87.43	70.91	0.8110
17	5	31.416	6.29	2.26	2.24	0.12	3.60	83.17	70.91	0.8526
18	4	25.133	5.03	1.44	2.20	0.12	3.48	79.04	36.30	0.4593
19	5	31.416	6.29	2.26	2.16	0.12	3.36	75.06	70.91	0.9447
20	5	31.416	6.29	2.26	2.13	0.12	3.24	71.21	70.91	0.9958
21	4	25.133	5.03	1.44	2.09	0.12	3.12	67.49	36.30	0.5380
22	4	25.133	5.03	1.44	2.05	0.11	3.01	63.90	36.30	0.5682
23	5	31.416	6.29	2.26	2.01	0.11	2.89	60.44	70.91	1.1733
24	4	25.133	5.03	1.44	1.97	0.11	2.78	57.10	36.30	0.6358
25	4	25.133	5.03	1.44	1.94	0.11	2.68	53.89	36.30	0.6737
26	3	18.85	3.77	0.81	1.90	0.11	2.57	50.80	15.32	0.3015
27	4	25.133	5.03	1.44	1.86	0.10	2.47	47.82	36.30	0.7591
28	4	25.133	5.03	1.44	1.82	0.10	2.36	44.97	36.30	0.8073
29	3	18.85	3.77	0.81	1.78	0.10	2.26	42.23	15.32	0.3627
30	3	18.85	3.77	0.81	1.75	0.10	2.17	39.60	15.32	0.3868
31	3	18.85	3.77	0.81	1.71	0.10	2.07	37.08	15.32	0.4131
32	4	25.133	5.03	1.44	1.67	0.09	1.98	34.66	36.30	1.0473
33	3	18.85	3.77	0.81	1.63	0.09	1.88	32.36	15.32	0.4733
34	2	12.566	2.52	0.36	1.59	0.09	1.80	30.15	4.54	0.1505
35	3	18.85	3.77	0.81	1.55	0.09	1.71	28.05	15.32	0.5460
36	3	18.85	3.77	0.81	1.52	0.09	1.62	26.04	15.32	0.5881
37	2	12.566	2.52	0.36	1.48	0.08	1.54	24.14	4.54	0.1880
38	3	18.85	3.77	0.81	1.44	0.08	1.46	22.32	15.32	0.6862
39	2	12.566	2.52	0.36	1.40	0.08	1.38	20.60	4.54	0.2203
40	2	12.566	2.52	0.36	1.36	0.08	1.30	18.96	4.54	0.2393
41	2	12.566	2.52	0.36	1.32	0.07	1.23	17.42	4.54	0.2606
42	1	6.2832	1.26	0.09	1.29	0.07	1.16	15.95	0.57	0.0356
43	2	12.566	2.52	0.36	1.25	0.07	1.09	14.57	4.54	0.3114
44	1	6.2832	1.26	0.09	1.21	0.07	1.02	13.27	0.57	0.0427
45	2	12.566	2.52	0.36	1.17	0.07	0.95	12.05	4.54	0.3765

46	1	6.2832	1.26	0.09	1.13	0.06	0.89	10.91	0.57	0.0520
47	1	6.2832	1.26	0.09	1.09	0.06	0.82	9.83	0.57	0.0577
48	1	6.2832	1.26	0.09	1.05	0.06	0.76	8.83	0.57	0.0642
49	1	6.2832	1.26	0.09	1.01	0.06	0.71	7.90	0.57	0.0718
50	0	0	0.00	0.00	0.98	0.06	0.65	7.03	0.00	0.0000
51	1	6.2832	1.26	0.09	0.94	0.05	0.60	6.23	0.57	0.0911
52	1	6.2832	1.26	0.09	0.90	0.05	0.55	5.49	0.57	0.1034

Prueba 2										
Tiempo [s]	Rps	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica H_{Ti} [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0	0.00	0.00	2.84	0.00	6.00	-	-	-
1	4	25.133	5.03	1.44	2.84	0.16	5.84	167.16	36.30	0.2172
2	7	43.982	8.81	4.42	2.80	0.16	5.69	162.93	194.57	1.1942
3	6	37.699	7.55	3.25	2.77	0.15	5.53	156.51	122.53	0.7829
4	7	43.982	8.81	4.42	2.73	0.15	5.38	150.24	194.57	1.2951
5	6	37.699	7.55	3.25	2.69	0.15	5.23	144.13	122.53	0.8501
6	7	43.982	8.81	4.42	2.65	0.15	5.09	138.19	194.57	1.4080
7	6	37.699	7.55	3.25	2.62	0.15	4.94	132.42	122.53	0.9253
8	6	37.699	7.55	3.25	2.58	0.14	4.80	126.80	122.53	0.9663
9	6	37.699	7.55	3.25	2.54	0.14	4.66	121.35	122.53	1.0097
10	5	31.416	6.29	2.26	2.50	0.14	4.52	116.05	70.91	0.6110
11	6	37.699	7.55	3.25	2.47	0.14	4.38	110.90	122.53	1.1048
12	6	37.699	7.55	3.25	2.43	0.14	4.24	105.91	122.53	1.1569
13	5	31.416	6.29	2.26	2.39	0.13	4.11	101.07	70.91	0.7016
14	5	31.416	6.29	2.26	2.35	0.13	3.98	96.38	70.91	0.7357
15	5	31.416	6.29	2.26	2.31	0.13	3.85	91.83	70.91	0.7721
16	5	31.416	6.29	2.26	2.28	0.13	3.72	87.43	70.91	0.8110
17	5	31.416	6.29	2.26	2.24	0.12	3.60	83.17	70.91	0.8526
18	5	31.416	6.29	2.26	2.20	0.12	3.48	79.04	70.91	0.8971
19	5	31.416	6.29	2.26	2.16	0.12	3.36	75.06	70.91	0.9447
20	4	25.133	5.03	1.44	2.13	0.12	3.24	71.21	36.30	0.5099
21	5	31.416	6.29	2.26	2.09	0.12	3.12	67.49	70.91	1.0507
22	4	25.133	5.03	1.44	2.05	0.11	3.01	63.90	36.30	0.5682
23	4	25.133	5.03	1.44	2.01	0.11	2.89	60.44	36.30	0.6007
24	4	25.133	5.03	1.44	1.97	0.11	2.78	57.10	36.30	0.6358
25	4	25.133	5.03	1.44	1.94	0.11	2.68	53.89	36.30	0.6737
26	4	25.133	5.03	1.44	1.90	0.11	2.57	50.80	36.30	0.7147
27	4	25.133	5.03	1.44	1.86	0.10	2.47	47.82	36.30	0.7591
28	3	18.85	3.77	0.81	1.82	0.10	2.36	44.97	15.32	0.3406
29	3	18.85	3.77	0.81	1.78	0.10	2.26	42.23	15.32	0.3627
30	4	25.133	5.03	1.44	1.75	0.10	2.17	39.60	36.30	0.9169
31	3	18.85	3.77	0.81	1.71	0.10	2.07	37.08	15.32	0.4131
32	3	18.85	3.77	0.81	1.67	0.09	1.98	34.66	15.32	0.4418
33	3	18.85	3.77	0.81	1.63	0.09	1.88	32.36	15.32	0.4733
34	3	18.85	3.77	0.81	1.59	0.09	1.80	30.15	15.32	0.5079
35	2	12.566	2.52	0.36	1.55	0.09	1.71	28.05	4.54	0.1618
36	3	18.85	3.77	0.81	1.52	0.09	1.62	26.04	15.32	0.5881
37	2	12.566	2.52	0.36	1.48	0.08	1.54	24.14	4.54	0.1880
38	3	18.85	3.77	0.81	1.44	0.08	1.46	22.32	15.32	0.6862

39	2	12.566	2.52	0.36	1.40	0.08	1.38	20.60	4.54	0.2203
40	2	12.566	2.52	0.36	1.36	0.08	1.30	18.96	4.54	0.2393
41	2	12.566	2.52	0.36	1.32	0.07	1.23	17.42	4.54	0.2606
42	1	6.2832	1.26	0.09	1.29	0.07	1.16	15.95	0.57	0.0356
43	2	12.566	2.52	0.36	1.25	0.07	1.09	14.57	4.54	0.3114
44	1	6.2832	1.26	0.09	1.21	0.07	1.02	13.27	0.57	0.0427
45	2	12.566	2.52	0.36	1.17	0.07	0.95	12.05	4.54	0.3765
46	1	6.2832	1.26	0.09	1.13	0.06	0.89	10.91	0.57	0.0520
47	1	6.2832	1.26	0.09	1.09	0.06	0.82	9.83	0.57	0.0577
48	1	6.2832	1.26	0.09	1.05	0.06	0.76	8.83	0.57	0.0642
49	0	0	0.00	0.00	1.01	0.06	0.71	7.90	0.00	0.0000
50	1	6.2832	1.26	0.09	0.98	0.06	0.65	7.03	0.57	0.0807
51	1	6.2832	1.26	0.09	0.94	0.05	0.60	6.23	0.57	0.0911

Prueba 3										
Tiempo [s]	Rps	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Torque generado \vec{T} [N · m]	Caudal $Q_{sum,i}$ [l/s]	ΔZ [m]	Carga hidráulica $H_{T,i}$ [m]	Trabajo teórico [W]	Trabajo absorbido [W]	Eficiencia Turbina
0	0	0	0.00	0.00	2.84	0.00	6.00	-	-	-
1	2	12.6	2.52	0.36	2.84	0.16	5.84	167.16	4.54	0.0271
2	6	37.7	7.55	3.25	2.80	0.16	5.69	162.93	122.53	0.7520
3	7	44	8.81	4.42	2.77	0.15	5.53	156.51	194.57	1.2431
4	7	44	8.81	4.42	2.73	0.15	5.38	150.24	194.57	1.2951
5	6	37.7	7.55	3.25	2.69	0.15	5.23	144.13	122.53	0.8501
6	6	37.7	7.55	3.25	2.65	0.15	5.09	138.19	122.53	0.8866
7	6	37.7	7.55	3.25	2.62	0.15	4.94	132.42	122.53	0.9253
8	6	37.7	7.55	3.25	2.58	0.14	4.80	126.80	122.53	0.9663
9	6	37.7	7.55	3.25	2.54	0.14	4.66	121.35	122.53	1.0097
10	6	37.7	7.55	3.25	2.50	0.14	4.52	116.05	122.53	1.0558
11	6	37.7	7.55	3.25	2.47	0.14	4.38	110.90	122.53	1.1048
12	5	31.4	6.29	2.26	2.43	0.14	4.24	105.91	70.91	0.6695
13	6	37.7	7.55	3.25	2.39	0.13	4.11	101.07	122.53	1.2123
14	5	31.4	6.29	2.26	2.35	0.13	3.98	96.38	70.91	0.7357
15	5	31.4	6.29	2.26	2.31	0.13	3.85	91.83	70.91	0.7721
16	5	31.4	6.29	2.26	2.28	0.13	3.72	87.43	70.91	0.8110
17	5	31.4	6.29	2.26	2.24	0.12	3.60	83.17	70.91	0.8526
18	5	31.4	6.29	2.26	2.20	0.12	3.48	79.04	70.91	0.8971
19	5	31.4	6.29	2.26	2.16	0.12	3.36	75.06	70.91	0.9447
20	4	25.1	5.03	1.44	2.13	0.12	3.24	71.21	36.30	0.5099
21	5	31.4	6.29	2.26	2.09	0.12	3.12	67.49	70.91	1.0507
22	4	25.1	5.03	1.44	2.05	0.11	3.01	63.90	36.30	0.5682
23	4	25.1	5.03	1.44	2.01	0.11	2.89	60.44	36.30	0.6007
24	4	25.1	5.03	1.44	1.97	0.11	2.78	57.10	36.30	0.6358
25	4	25.1	5.03	1.44	1.94	0.11	2.68	53.89	36.30	0.6737
26	4	25.1	5.03	1.44	1.90	0.11	2.57	50.80	36.30	0.7147
27	4	25.1	5.03	1.44	1.86	0.10	2.47	47.82	36.30	0.7591
28	3	18.8	3.77	0.81	1.82	0.10	2.36	44.97	15.32	0.3406
29	3	18.8	3.77	0.81	1.78	0.10	2.26	42.23	15.32	0.3627
30	4	25.1	5.03	1.44	1.75	0.10	2.17	39.60	36.30	0.9169
31	3	18.8	3.77	0.81	1.71	0.10	2.07	37.08	15.32	0.4131
32	3	18.8	3.77	0.81	1.67	0.09	1.98	34.66	15.32	0.4418

33	3	18.8	3.77	0.81	1.63	0.09	1.88	32.36	15.32	0.4733
34	3	18.8	3.77	0.81	1.59	0.09	1.80	30.15	15.32	0.5079
35	3	18.8	3.77	0.81	1.55	0.09	1.71	28.05	15.32	0.5460
36	2	12.6	2.52	0.36	1.52	0.09	1.62	26.04	4.54	0.1742
37	3	18.8	3.77	0.81	1.48	0.08	1.54	24.14	15.32	0.6346
38	2	12.6	2.52	0.36	1.44	0.08	1.46	22.32	4.54	0.2033
39	2	12.6	2.52	0.36	1.40	0.08	1.38	20.60	4.54	0.2203
40	2	12.6	2.52	0.36	1.36	0.08	1.30	18.96	4.54	0.2393
41	2	12.6	2.52	0.36	1.32	0.07	1.23	17.42	4.54	0.2606
42	2	12.6	2.52	0.36	1.29	0.07	1.16	15.95	4.54	0.2844
43	1	6.28	1.26	0.09	1.25	0.07	1.09	14.57	0.57	0.0389
44	2	12.6	2.52	0.36	1.21	0.07	1.02	13.27	4.54	0.3419
45	1	6.28	1.26	0.09	1.17	0.07	0.95	12.05	0.57	0.0471
46	1	6.28	1.26	0.09	1.13	0.06	0.89	10.91	0.57	0.0520
47	1	6.28	1.26	0.09	1.09	0.06	0.82	9.83	0.57	0.0577
48	1	6.28	1.26	0.09	1.05	0.06	0.76	8.83	0.57	0.0642
49	1	6.28	1.26	0.09	1.01	0.06	0.71	7.90	0.57	0.0718
50	1	6.28	1.26	0.09	0.98	0.06	0.65	7.03	0.57	0.0807
51	0	0	0.00	0.00	0.94	0.05	0.60	6.23	0.00	0.0000
52	1	6.28	1.26	0.09	0.90	0.05	0.55	5.49	0.57	0.1034
53	1	6.28	1.26	0.09	0.86	0.05	0.50	4.81	0.57	0.1180

Estimación de energía generada por el sistema operando con 6.0 metros de carga hidráulica

Prueba 1								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
1	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
2	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
3	7	43.982	8.81	194.57	24.81	5.36	133.10	0.6841
4	7	43.982	8.81	194.57	24.81	5.36	133.10	0.6841
5	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
6	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
7	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
8	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
9	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
10	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
11	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
12	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
13	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
14	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
15	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
16	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
17	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
18	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
19	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
20	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
21	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
22	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
23	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
24	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
25	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
26	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
27	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
28	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
29	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
30	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
31	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
32	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
33	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
34	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
35	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
36	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
37	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
38	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
39	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
40	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
41	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
42	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
43	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
44	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
45	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
46	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

47	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
48	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
49	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
50	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
51	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
52	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Prueba 2								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
1	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
2	7	43.982	8.81	194.57	24.81	5.36	133.10	0.6841
3	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
4	7	43.982	8.81	194.57	24.81	5.36	133.10	0.6841
5	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
6	7	43.982	8.81	194.57	24.81	5.36	133.10	0.6841
7	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
8	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
9	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
10	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
11	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
12	6	37.699	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
13	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
14	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
15	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
16	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
17	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
18	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
19	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
20	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
21	5	31.416	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
22	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
23	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
24	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
25	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
26	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
27	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
28	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
29	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
30	4	25.133	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
31	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
32	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
33	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
34	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
35	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
36	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
37	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
38	3	18.85	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
39	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000

40	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
41	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
42	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
43	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
44	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
45	2	12.566	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
46	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
47	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
48	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
49	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
50	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
51	1	6.2832	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000

Prueba 3								
Tiempo [s]	Rev. Por seg.	rad/s	Velocidad tangencial \vec{V}_t [m/s]	Trabajo adsorbido \dot{W}_{gen} [W]	Voltaje generado V_{gen} [V]	Corriente eléctrica I_{gen} [A]	Potencia Generador [W]	Eficiencia Generador
0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
1	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
2	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
3	7	44	8.81	194.57	24.81	5.36	133.10	0.6841
4	7	44	8.81	194.57	24.81	5.36	133.10	0.6841
5	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
6	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
7	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
8	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
9	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
10	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
11	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
12	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
13	6	37.7	7.55	122.53	21.19	3.78	80.02	0.6531
14	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
15	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
16	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
17	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
18	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
19	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
20	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
21	5	31.4	6.29	70.91	17.57	2.24	39.34	0.5548
22	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
23	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
24	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
25	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
26	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
27	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
28	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
29	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
30	4	25.1	5.03	36.30	13.95	0.75	10.50	0.2892
31	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
32	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
33	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000

34	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
35	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
36	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
37	3	18.8	3.77	15.32	10.34	-0.68	0.00	0.0000
38	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
39	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
40	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
41	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
42	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
43	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
44	2	12.6	2.52	4.54	6.73	-2.07	0.00	0.0000
45	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
46	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
47	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
48	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
49	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
50	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
51	0	0	0.00	0.00	-0.48	-4.69	2.23	0.0000
52	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000
53	1	6.28	1.26	0.57	3.13	-3.41	0.00	0.0000